



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ULB

Bewertung und Nutzung immersiver Methoden der Digitalen Realität für Bau- & Umweltingenieuranwendungen innerhalb der Lehre und Praxis

Eller, Christian
(2020)

DOI (TUprints): <https://doi.org/10.25534/tuprints-00012788>

Lizenz:



CC-BY-NC-ND 4.0 International - Creative Commons, Namensnennung, nicht kommerziell, keine Bearbeitung

Publikationstyp: Buch

Fachbereich: 13 Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften

Quelle des Originals: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/12788>

Bewertung und Nutzung immersiver Methoden der Digitalen Realität für Bau- & Umwelt- ingenieuranwendungen innerhalb der Lehre und Praxis

Dissertation

Zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation von Christian Eller, M.Sc. aus München
Tag der Einreichung: 20.04.2020, Tag der Prüfung: 16.07.2020
Darmstadt — D 17

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Uwe Rüppel
2. Gutachten: Prof. Dr. ir. Eduardus Koenders



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Fachbereich Bau- und Umweltingenieur-
wissenschaften
Institut für Numerische Methoden und
Informatik im Bauwesen

Bewertung und Nutzung immersiver Methoden der Digitalen Realität für Bau- & Umwelt-
ingenieuranwendungen innerhalb der Lehre und Praxis
Dissertation

Genehmigte Dissertation von Christian Eller, M.Sc. aus München

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Uwe Rüppel
2. Gutachten: Prof. Dr. ir. Eduardus Koenders

Tag der Einreichung: 20.04.2020

Tag der Prüfung: 16.07.2020

Darmstadt — D 17

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-127885

URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/12788>

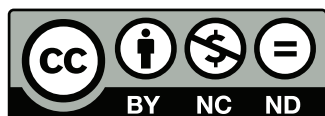
ISBN: 978-3-8440-7555-7

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints,

E-Publishing-Service der TU Darmstadt

<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>

tuprints@ulb.tu-darmstadt.de



Die Veröffentlichung steht unter folgender Creative Commons Lizenz:

Namensnennung – Keine kommerzielle Nutzung – Keine Bearbeitung 4.0 International

(CC BY-NC-ND 4.0 International) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.de>

Geschrieben für
Lilou Maia
Sarah
Bärbel



Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen der Technischen Universität. Hier habe ich neben der Betreuung von Lehrveranstaltungen und Forschung in den Projekten SolConPro, INSITU und VR4Teach im Darmstadt Civil, Environmental and Safety Engineering Lab (DACES) die verschiedenen Formen und Möglichkeiten der virtuellen und erweiterten Realität kennengelernt und ausprobiert.

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Rüppel für die Möglichkeit zur Promotion, seine fachliche und moralische Unterstützung, sowie die technischen Möglichkeiten und Freiräume zur Entwicklung dieses Konzepts. Ebenfalls danke ich für die Übernahme des Hauptreferats.

Ebenfalls möchte ich mich bei Prof. Dr. ir. Eddie Koenders für die Übernahme des Koreferats bedanken. Die stetig freundlichen und aufmunternden Worte in der Bearbeitungszeit motivierten und halfen bei der Verwirklichung dieser Arbeit.

Ganz besonders möchte ich mich bei Timo Bittner, Marcus Dombois und Christian Leifgen für die gute Zusammenarbeit und den fachlichen Austausch bedanken. Die gemeinsamen Entwicklungen haben in mir das Interesse an wissenschaftlichen Arbeiten geweckt und mich zu diesem Promotionsthema geleitet. Die gemeinsamen Diskussionen haben immer wieder zu richtigen Gedankenansätzen geführt.

Weiterer Dank gilt meinen Kollegen und Kolleginnen am Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen der Technischen Universität für die gute Zusammenarbeit, die lockere Arbeitsatmosphäre und die fachlichen Diskussionen. Ein großer Dank an Timo Bittner, Marcus Dombois, Christian Leifgen, Michael Kreger, Tim Huyeng, Patrick Scheich, Michael Disser, Meiling Shi, Christian Thiele und Luisa Kuhn. Ebenfalls bedanke ich mich bei den Studierenden, deren Arbeiten ich betreuen durfte und die mich als studentische Hilfskräfte in Lehre und Forschung unterstützt haben. Insbesondere danke ich Pascal Mosler, Michael Belwe, Yuke Lou, Sewin Tariverdian, Ender-Musa Gülacti und David Breuer.

Meinem Bruder, Andreas, danke ich für die Abenteuer, die wir erlebt haben und somit den Mut jedes weitere Abenteuer anzunehmen. Meiner Frau Sarah danke ich für den Rückhalt, die moralische Unterstützung und das Zuhören zu meinen vielen verschiedenen Gedanken. Meiner Tochter, Lilou Maia, danke ich für das Zuhören, viele Grinsen und die Motivation diese Arbeit stetig weiterzubringen. Besonders danke ich meiner Mutter, Bärbel Eller, dafür, dass sie zu Lebzeiten keine Mühen gescheut hat, um mir diesen Lebensweg zu ermöglichen und mich darüber hinaus immer und überall begleitet. Danke für dein Licht und deine Stärke.

Christian Eller ☺

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	IX
1. Einführung	1
1.1. Motivation	2
1.2. Zielsetzung	3
1.3. Aufbau der Arbeit	4
2. Grundlagen zur immersiven Wahrnehmung	7
2.1. Menschliche Wahrnehmung - Beispielen der Sinne	7
2.1.1. Grundbegriffe der natürlichen und künstlichen Realität	7
2.1.2. Visuelle Wahrnehmung	8
2.1.3. Auditive Wahrnehmung	16
2.1.4. Haptische Wahrnehmung	20
2.1.5. Olfaktorische Wahrnehmung	24
2.1.6. Gustatorische Wahrnehmung	27
2.1.7. Zusammenfassung der menschlichen Wahrnehmung	29
2.2. Mensch-Maschine-Schnittstellen und Interaktion	29
2.2.1. Möglichkeiten der Interaktion	30
2.2.2. Möglichkeiten der Kollaboration und Kommunikation	32
2.2.3. Möglichkeiten der künstlichen Fortbewegung	33
2.2.4. Zusammenfassung der Mensch-Maschine Interaktion	37
2.3. Immersion und das Gefühl von Präsenz	37
2.3.1. Definition von Immersion und Präsenz	38
2.3.2. Beschreibung des Körpergefühls	39
2.3.3. Positive Effekte durch Immersion und Präsenz	39
2.3.4. Möglichkeiten zur Steigerung der Immersion und Präsenz	40
2.3.5. Negative Folgen falscher Immersion und Präsenz	42
2.3.6. Messung der Immersion und Präsenz	44
2.3.7. Zusammenfassung zu Immersion und Präsenz	45
2.4. Zusammenfassung der Grundlagen	45
3. Analyse der Digitalen Realität und der Einsatz in den digitalen Ingenieurmethoden	47
3.1. Der Begriff und die Technologien der Digitalen Realität	47
3.1.1. Definition der Digitalen Realität	49

3.1.2.	Grundbegriffe Freiheitsgrade & Anwendungsbereich	50
3.1.3.	2D-Anwendungen	53
3.1.4.	Foto & Video	54
3.1.5.	3D-Anwendungen	54
3.1.6.	360°- Foto & Video und Stereoskopie	54
3.1.7.	Virtuelle Realität	55
3.1.8.	Erweiterte Virtualität oder auch Reale Virtualität	57
3.1.9.	Erweiterte Realität	57
3.1.10.	Mixed-Reality	58
3.1.11.	Zusammenfassung der Digitalen Realität	59
3.2.	Einsatz im Bereich der Ingenieurwissenschaften	59
3.2.1.	BIM in der Digitalen Realität	59
3.2.2.	Anwendungen im Bereich der Lehre, Ausbildung und Training für Bau- & Umwelt- wesen	61
3.2.3.	Anwendungen im Bereich der Planung im Bau- & Umweltwesen	64
3.2.4.	Anwendungen im Bereich der Planausführung und des Baus	65
3.2.5.	Anwendungen im Bereich des Betriebs und der Wartung im Bau- & Umweltwesen	66
3.2.6.	Eigene Entwicklungen im Kontext digitaler Ingenieurmethoden	66
3.2.7.	Diskussion zur Verwendung neuer digitaler Ingenieurmethoden in der Digitalen Realität	68
3.2.8.	Zusammenfassung im Bereich der Ingenieurwissenschaften	69
3.3.	Zusammenfassung der Analyse	69

4.	Pan-Faktor: Konzept zur Bewertung und Entwicklung digitaler Ingenieurmethoden der Digitalen Realität	71
4.1.	Datenaufnahme und Datenbewertung	71
4.1.1.	Anwendungsbereich und Freiheitsgrade der auditiven Wahrnehmung	72
4.1.2.	Anwendungsbereich und Freiheitsgrade der visuellen Wahrnehmung	73
4.1.3.	Anwendungsbereich und Freiheitsgrade der haptischen Wahrnehmung	74
4.1.4.	Anwendungsbereich und Freiheitsgrade der olfaktorischen und gustatorischen Wahrnehmung	75
4.1.5.	Anwendungsbereich und Freiheitsgrade von Bewegungsplattformen	75
4.2.	Bewertungsskala für die Digitale Realität - Der Pan-Faktor	76
4.2.1.	Der Einflussfaktor Immersion	78
4.2.2.	Der Einflussfaktor Präsenz	86
4.2.3.	Der Einflussfaktor Wechselwirkung	89
4.2.4.	Die Abweichung als negativer Faktor	92
4.2.5.	Zusammenfassung des Pan-Faktors	93
4.3.	Konzept zur Handlungsempfehlung für die ingenieurgerechte Anwendungsentwicklung in der Digitalen Realität	94
4.3.1.	Anforderungen an eine Handlungsempfehlung	95

4.3.2.	Der Pan-Faktor als Vergleichsparameter	96
4.3.3.	Analyse vorhandener Ingenieur Anwendungen im Bereich der Digitalen Realität . .	96
4.3.4.	Der Dynamische Fragebogen	97
4.3.5.	Zusammenfassung des Konzepts für eine Handlungsempfehlung mittels Pan-Faktor	112
4.4.	Zusammenfassung des Konzepts	113
5.	Umsetzung des Pan-Faktors und einer Handlungsempfehlung für Ingenieur Anwendungen in der Digitalen Realität	115
5.1.	Umsetzung des Pan-Faktors	115
5.1.1.	Der Pan-Faktor als Zahl	116
5.1.2.	Excel-Tabelle als Pan-Meter	117
5.1.3.	Intelligente Webseite als Pan-Meter	119
5.1.4.	Umgang mit dem Abweichungsfaktor $\Delta\delta$	126
5.1.5.	Zusammenfassung zum Pan-Meter	127
5.2.	Bewertung ingenieurtechnischer Anwendungen der Digitalen Realität	127
5.2.1.	Parameter der Analyse	128
5.2.2.	Ausbildung im Bau- und Umweltwesen	130
5.2.3.	Planung im Bau- und Umweltwesen	130
5.2.4.	Ausführung im Bau- und Umweltwesen	131
5.2.5.	Betrieb im Bau- und Umweltwesen	131
5.2.6.	Mediennutzung der Digitalen Realität im Ingenieurkontext	131
5.2.7.	Zusammenfassung der Bewertung von Ingenieur Anwendungen	133
5.3.	Entwicklung einer Handlungsempfehlung	133
5.3.1.	Der Aufbau der Webseite	134
5.3.2.	Das Umsetzungsprinzip des dynamischen Fragebogens	136
5.3.3.	Der Empfehlungsaufbau	138
5.3.4.	Die Funktionsweise der Webseite	141
5.3.5.	Zusammenfassung von HEL.P	149
5.4.	Zusammenfassung der Umsetzung	149
6.	Verifizierung und Validierung des Pan-Faktors, Pan-Meters und HEL.P.	151
6.1.	Technische Verifizierung	151
6.1.1.	Funktionstest - Lokal	152
6.1.2.	Funktionstest - Netzwerk	155
6.2.	Validierung anhand der Durchführung und der Umsetzung von „VR4Teach“	156
6.2.1.	Anforderungen und Ziele des Projekts VR4Teach	157
6.2.2.	Durchführung von HEL.P für VR4Teach	158
6.2.3.	Umsetzungsergebnisse des Projekts	159
6.2.4.	Durchführung des Pan-Meters	163
6.2.5.	Vergleich der Handlungsempfehlung und des ermittelten Pan-Faktors	165
6.3.	Zusammenfassung und Fazit der Verifizierung und Validierung	166

7. Resultat und Diskussion	167
7.1. Fazit	167
7.2. Diskussion der Ergebnisse	169
7.3. Diskussion zu den Grenzen der Digitalen Realität	170
8. Zusammenfassung und Ausblick	173
8.1. Zusammenfassung der Arbeit	173
8.2. Ausblick zum Einsatz der entwickelten Konzepte	174
Abkürzungsverzeichnis	XI
Literatur	XIII
Nicht veröffentlichte studentische Abschlussarbeiten	XXV
Anwendungen der Digitalen Realität	XXVI
Hardwarekomponenten	XXXII
A. Anhang	XLIII
A.1. Hardwarekomponenten zur Bespielung der Sinne	XLIII
A.1.1. Visuelle Displays	XLIII
A.1.2. Auditive Displays	XLVII
A.1.3. Haptische Displays	LI
A.1.4. Olfaktorische Displays	LVII
A.1.5. Gustatorische Displays	LIX
A.1.6. Bewegungsplattformen	LX
A.2. Ingenieur Anwendungen in der Digitalen Realität	LXV
A.3. Handlungsempfehlung mittels Pan-Faktor	LXXII
A.3.1. Übersicht	LXXII
A.3.2. Fragesammlung	LXXIII
A.3.3. Medienempfehlung	LXXVI
A.4. Umsetzung des Pan-Faktors als Pan-Meter und der Handlungsempfehlung als HEL.P	LXXIX
A.4.1. Excel-Tabellenkalkulation als Pan-Meter	LXXIX
A.4.2. Webseite als Pan-Meter	LXXXI
A.4.3. Webseite als HEL.P	LXXXV

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1.	Trend von VR, AR & MR	2
Abbildung 1-2.	Investitionskosten von VR, AR & MR	3
Abbildung 1-3.	Ziel der Arbeit mit Pan-Faktor & HEL.P als Werkzeuge für Ingenieure und Ingenieurinnen	4
Abbildung 2-1.	Übersicht der Realitätsformen & Technologien der Digitalen Realität	8
Abbildung 2-2.	Vergleich von High-Poly, Middle-Poly & Low-Poly	10
Abbildung 2-3.	Vergleich der technologischen visuellen Möglichkeiten mit der realen Wahrnehmung	11
Abbildung 2-4.	Textur und Material zur realistischen Gestaltung von Objekten	12
Abbildung 2-5.	Technische Möglichkeiten der visuellen Displays	13
Abbildung 2-6.	Beispiele zur Hardwarelösung der visuellen Displays	14
Abbildung 2-7.	Vergleich der technologischen auditiven Möglichkeiten mit der realen Wahrnehmung	17
Abbildung 2-8.	Technische Möglichkeiten der auditiven Displays	18
Abbildung 2-9.	Beispiele zur Hardwarelösung der auditiven Displays	19
Abbildung 2-10.	Technische Möglichkeiten der haptischen Displays	21
Abbildung 2-11.	Beispiele zur Hardwarelösung der haptischen Displays	22
Abbildung 2-12.	Technische Möglichkeiten der olfaktorischen Displays	25
Abbildung 2-13.	Beispiele zur Hardwarelösung der olfaktorischen Displays	26
Abbildung 2-14.	Technische Möglichkeiten der gustatorischen Displays	28
Abbildung 2-15.	Beispiele zur Hardwarelösung der gustatorischen Displays	29
Abbildung 2-16.	Umsetzungsmöglichkeiten der Interaktion	31
Abbildung 2-17.	Umsetzungsmöglichkeiten der Kommunikation	32
Abbildung 2-18.	Umsetzungsmöglichkeiten der Bewegung	33
Abbildung 2-19.	Beispiele zur Hardwarelösung der simulierten Fortbewegung	36
Abbildung 2-20.	Die Akzeptanz in Bezug auf den Fortschritt und die Immersion	41
Abbildung 3-1.	Meilensteine der Digitalen Realität	48
Abbildung 3-2.	Erweitertes Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum mittels Digitaler Realität	49
Abbildung 3-3.	Erläuterung der sechs Freiheitsgrade im dreidimensionalen Raum	51
Abbildung 3-4.	Freiheitsgrade des Menschen	52
Abbildung 4-1.	Anwendungsbereiche (FOR) verschiedener Sinne des Menschen	72
Abbildung 4-2.	Aufbau des Pan-Faktors	78
Abbildung 4-3.	Beispiel zur Bewertung der visuellen Qualität anhand des Pan-Faktor	85
Abbildung 4-4.	Konzept für eine Handlungsempfehlung mittels Pan-Faktor	95

Abbildung 4-5.	Übersicht zum Aufbau des dynamischen Fragebogens	98
Abbildung 4-6.	Handlungsempfehlung Bereich 1: Definieren des Anwendungsbereichs	99
Abbildung 4-7.	Handlungsempfehlung Bereich 2: Filtern des geeigneten Mediums	100
Abbildung 4-8.	Handlungsempfehlung Bereich 3 I: Visuelle Wahrnehmung	102
Abbildung 4-9.	Handlungsempfehlung Bereich 3 II: Auditive Wahrnehmung	103
Abbildung 4-10.	Handlungsempfehlung Bereich 3 III: Haptische Wahrnehmung	105
Abbildung 4-11.	Handlungsempfehlung Bereich 3 IV: Olfaktorische Wahrnehmung	106
Abbildung 4-12.	Handlungsempfehlung Bereich 3 V: Gustatorische Wahrnehmung	107
Abbildung 4-13.	Handlungsempfehlung Bereich 4 I: Körpergefühl	109
Abbildung 4-14.	Handlungsempfehlung Bereich 4 II: Bewegung	110
Abbildung 4-15.	Handlungsempfehlung Bereich 5 I: Kommunikation	111
Abbildung 4-16.	Handlungsempfehlung Bereich 5 II: Interaktion	113
Abbildung 5-1.	Pan-Punkte für Immersion, Präsenz, Wechselwirkung und Pan-Faktor	117
Abbildung 5-2.	Ergebnis des Pan-Meters in Form der Excel-Tabellenkalkulation	119
Abbildung 5-3.	UML-Komponentendiagramm für das Pan-Meter	120
Abbildung 5-4.	Beispiel eines Tooltips mit Informationen zur Definition	122
Abbildung 5-5.	Screenshot des geführten Fragebogens des Pan-Meters	123
Abbildung 5-6.	UML-Sequenzdiagramm zur Erstellung des Pan-Faktors & Exports	124
Abbildung 5-7.	Darstellung des Ergebnisses des Pan-Meters in der Webseite	125
Abbildung 5-8.	Kategorischer Vergleich von Ingenieur Anwendungen anhand des Pan-Faktors	129
Abbildung 5-9.	Pan-Faktor & Potentiale für Ingenieur Anwendungen in der Digitalen Realität	132
Abbildung 5-10.	UML-Komponentendiagramm zur Durchführung von HEL.P	135
Abbildung 5-11.	Ausgewählte Screenshots zur Dynamik des Fragebogens	137
Abbildung 5-12.	Übersicht über die drei Szenarien von HEL.P	139
Abbildung 5-13.	Übersicht über die drei Empfehlungsvarianten von HEL.P in Abhängigkeit des erweiterten Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum	140
Abbildung 5-14.	Screenshot der Startseite von HEL.P	142
Abbildung 5-15.	UML-Sequenzdiagramm zur Durchführung von HEL.P	143
Abbildung 5-16.	Screenshot des Ergebnisses von HEL.P	144
Abbildung 5-17.	Screenshot der interaktiven Detailansicht der Ergebnisse von HEL.P	146
Abbildung 5-18.	Screenshot der Abfrage zu Anwendungsfall 3	148
Abbildung 6-1.	UML-Komponentendiagramm von VR4Teach	160
Abbildung 6-2.	Screenshot einiger Umsetzungsergebnisse von VR4Teach	161
Abbildung 6-3.	UML-Ablaufdiagramm zur Ausführung von VR4Teach	162
Abbildung 6-4.	Ergebnisse für den Pan-Faktor durch verschiedene Probanden	165
Abbildung A-1.	Handlungsempfehlung mittels Pan-Faktor	LXXII
Abbildung A-2.	Fragebogen des Pan-Meters in der Excel-Tabellenkalkulation - Teil 1 von 2	LXXIX
Abbildung A-3.	Fragebogen des Pan-Meters in der Excel-Tabellenkalkulation - Teil 2 von 2	LXXX

Abbildung A-4.	PDF-Datei des Ergebnisses aus dem Pan-Meter - Teil 1 von 3	LXXXI
Abbildung A-5.	PDF-Datei des Ergebnisses aus dem Pan-Meter - Teil 2 von 3	LXXXII
Abbildung A-6.	PDF-Datei des Ergebnisses aus dem Pan-Meter - Teil 3 von 3	LXXXIII
Abbildung A-7.	Ergebnis von HEL.P-Anwendungsfall 1 - Teil 1 von 5	LXXXV
Abbildung A-8.	Ergebnis von HEL.P-Anwendungsfall 1 - Teil 2 von 5	LXXXVI
Abbildung A-9.	Ergebnis von HEL.P-Anwendungsfall 1 - Teil 3 von 5	LXXXVII
Abbildung A-10.	Ergebnis von HEL.P-Anwendungsfall 1 - Teil 4 von 5	LXXXVIII
Abbildung A-11.	Ergebnis von HEL.P-Anwendungsfall 1 - Teil 5 von 5	LXXXIX
Abbildung A-12.	Ergebnis von HEL.P-Anwendungsfall 3 - Teil 1 von 5	XC
Abbildung A-13.	Ergebnis von HEL.P-Anwendungsfall 3 - Teil 2 von 5	XCI
Abbildung A-14.	Ergebnis von HEL.P-Anwendungsfall 3 - Teil 3 von 5	XCII
Abbildung A-15.	Ergebnis von HEL.P-Anwendungsfall 3 - Teil 4 von 5	XCIII
Abbildung A-16.	Ergebnis von HEL.P-Anwendungsfall 3 - Teil 5 von 5	XCIV



Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1.	Vergleich der verschiedenen visuellen Displayarten	46
Tabelle 4-1.	Definition der Quantität im Pan-Faktor	80
Tabelle 4-2.	Qualitätsdefinition der visuellen Wahrnehmung	81
Tabelle 4-3.	Qualitätsdefinition der auditiven Wahrnehmung	82
Tabelle 4-4.	Qualitätsdefinition der haptischen Wahrnehmung	83
Tabelle 4-5.	Qualitätsdefinition der olfaktorischen Wahrnehmung	84
Tabelle 4-6.	Qualitätsdefinition der gustatorischen Wahrnehmung	84
Tabelle 4-7.	Qualitätsdefinition des Körpergefühls	87
Tabelle 4-8.	Qualitätsdefinition der Bewegung	88
Tabelle 4-9.	Qualitätsdefinition der Interaktion	90
Tabelle 4-10.	Qualitätsdefinition der Kommunikation	91
Tabelle 5-1.	Übersetzung der Qualität und Quantität in Pan-Punkte	116
Tabelle 6-1.	Testfälle zur Verifizierung des Pan-Faktors	153
Tabelle 6-2.	Antworten für VR4Teach innerhalb von HEL.P	158
Tabelle 6-3.	Antworten für VR4Teach innerhalb des Pan-Meters	163
Tabelle A-1.	Visuelle Displays in der Digitalen Realität	XLIII
Tabelle A-2.	Auditive Displays in der Digitalen Realität	XLVII
Tabelle A-3.	Kennwerte der auditiven Displays	XLIX
Tabelle A-4.	Haptische Displays in der Digitalen Realität	LI
Tabelle A-5.	Feedback der Haptischen Displays	LIV
Tabelle A-6.	Olfaktorische Displays in der Digitalen Realität	LVII
Tabelle A-7.	Gustatorische Displays in der Digitalen Realität	LIX
Tabelle A-8.	VR-Laufbänder in der Digitalen Realität	LX
Tabelle A-9.	Bewegungsmöglichkeiten der VR-Laufbänder	LXIII
Tabelle A-10.	Bewertete Ingenieur Anwendungen von VR, AR, AV & MR	LXV
Tabelle A-11.	Pan-Faktor der Ingenieur Anwendungen von VR, AR, AV & MR	LXVIII
Tabelle A-12.	Technischen Umsetzbarkeit des Pan-Faktors verschiedener Medien	LXXI
Tabelle A-13.	Fragen und Verknüpfungen der Handlungsempfehlung.	LXXIII
Tabelle A-14.	Medienempfehlungen	LXXVI
Tabelle A-15.	Ergebnisse der Probanden für die Bewertung des Pan-Faktors von VR4Teach .	LXXXIV

1 Einführung

„Der Bau von Luftschlössern kostet nichts. Aber ihre Zerstörung ist sehr teuer.“ - François Mauriac

Seit der Erfindung des Computers als Rechenmaschine wird das System durch Ingenieure und Ingenieurinnen als Hilfsmittel eingesetzt und es werden stetig komplexere Probleme abstrahiert und gelöst. Mit Steigerung der Rechenleistung wurden nicht nur einfache Rechnungen, sondern auch Simulationen zur Vorhersage und Bestimmung schwieriger Zustände ermittelt. Um die Durchführung solcher meist iterativen und algorithmischen Berechnungen durchzuführen und die Bedienung von Ingenieursoftware wie z. B. Computer Aided Drawing/Design (CAD)-Programmen zu vereinfachen, wird beständig an der Art der Visualisierung und der Interaktion von Mensch zur Maschine z. B. mittels Graphical User Interface (GUI) geforscht und weiter entwickelt. Ziel ist es die Bedienung einfach und intuitiv zu gestalten und die Ergebnisse präzise und verständlich zu präsentieren.

Zusätzlich findet durch die zahlreichen Spezialisierungen von Ingenieuren und Ingenieurinnen eine zunehmende Ausdifferenzierung der Software und eingesetzten Hardware statt. Zur Kommunikation zwischen unterschiedlichen Fachdisziplinen wächst demnach die Anforderung an Verständlichkeit in Bezug auf die Ergebnisse. Es wird versucht mit der BIM-Methodik ($\hat{=}$ Building Information Modeling (BIM)) dieses Verständnis zu schaffen und zusätzlich eine weitere Intelligenz in Form von Informations-Redundanzvermeidung und automatischer Fehlerdetektion möglichst automatisch umzusetzen. Ein großes Ziel ist es softwareseitig Unstimmigkeiten und Fehler zwischen verschiedenen Planungen unterschiedlicher Fachdisziplinen zu erkennen und Änderungen für alle Beteiligten nachvollziehbar zu übertragen. Dies führt zu Problemen und komplexen Fragestellungen in juristischer, mathematischer und moralischer Hinsicht, welche das Hilfsmittel Computer an seine Grenzen bringen. Diese Komplexität hat die Diskrepanz von Ingenieur- und Computerwissen zu Grunde. Computer und Software besitzen eine lediglich unterstützende Funktion wie die Objektgestaltung, Parametrisierung, Algorithmisierbarkeit und können mittels Netzwerke und Cloud-Computing Wissen gewinnen. Allerdings ist dieses Wissen nicht allumfassend und kann Software Entscheidungen bisher nur innerhalb bestimmter Grenzen z. B. Regeln treffen. Eine interaktive Visualisierung der unterschiedlichen Ergebnisse und Entwicklungen kann die Lücke von Mensch-Maschine bzw. Wissen & Logik-(Maschine) schließen.

Die Nutzung von immersiver Visualisierung als Hilfsmittel, um Situationen, Objekte und Gegenstände zu präsentieren, die zum Darstellungszeitpunkt nicht oder nur teilweise vorhanden sind, wird seit Menschengedenken eingesetzt z. B. steinzeitliche Höhlenmalerei. Die Bestrebung war im Laufe der Jahrhunderte eine immer realistischere Abbildung zu schaffen, welche in der Industrialisierung als fotografische Darstellung einen Höhepunkt schuf. Mit zunehmender Technisierung wurden die Formen der Visualisierung beständig digitalisiert und können heute neben der realistischen Abbildung in Form von Fotos und dynamischen Bildern in Form von Videos räumliche Bezüge natürlich dargestellt werden. Neue Technologien wie Virtuelle Realität (VR), Augmented Reality (AR) und deren Kombination in Mixed-Reality (MR) (dt. Gemischte Realität) ermöglichen über die reine Visualisierung hinaus eine Interaktion mit der künstlichen Abbildung, welche der natürlichen zunehmend angleicht. Diese Technologien sind

durch die rasant gestiegenen Rechenleistungen und Computer-Performanzen auch auf mobilen Endgeräten möglich. Gleichzeitig ist die Datenaufnahme in mehrdimensionaler Form immer einfacher und schneller möglich geworden. Es ist also zu beobachten, dass die reine Visualisierung und damit verbundene im Kopf stattfindende Vorstellung nicht mehr genügend ist, sondern auch eine möglichst natürliche Interaktion mit dem künstlich Gezeigten angestrebt wird. Diese Interaktion soll intuitiv und natürlich gestaltet sein. Es stellt sich die Frage inwieweit diese Entwicklung und neuen Technologien im Bereich der Ingenieurwissenschaften genutzt werden können. Hierfür muss klar ersichtlich werden, welche Formen der interaktiven Visualisierung möglich sind und deren Grenzen aufgezeigt werden.

1.1 Motivation

Bei Betrachtung der neuen Technologien von VR, AR und Mixed-Reality zeigt sich, dass diese ein immer größeres Interesse in Forschung und Öffentlichkeit wecken. Mit steigender Anzahl an Hardwarekomponenten und durch die Senkung der Anschaffungskosten seit der Entwicklung im Jahre 1968 von Sutherland [297], ist es auch zunehmend wahrscheinlich eine passende Lösung in unterschiedlichen Bereichen zu finden. Der Trendabfrage der Suchmaschine Google¹ zufolge ist das weltweite Interesse seit der öffentlichen Zugänglichkeit dieser Technologien rasant gestiegen (siehe Abbildung 1-1).

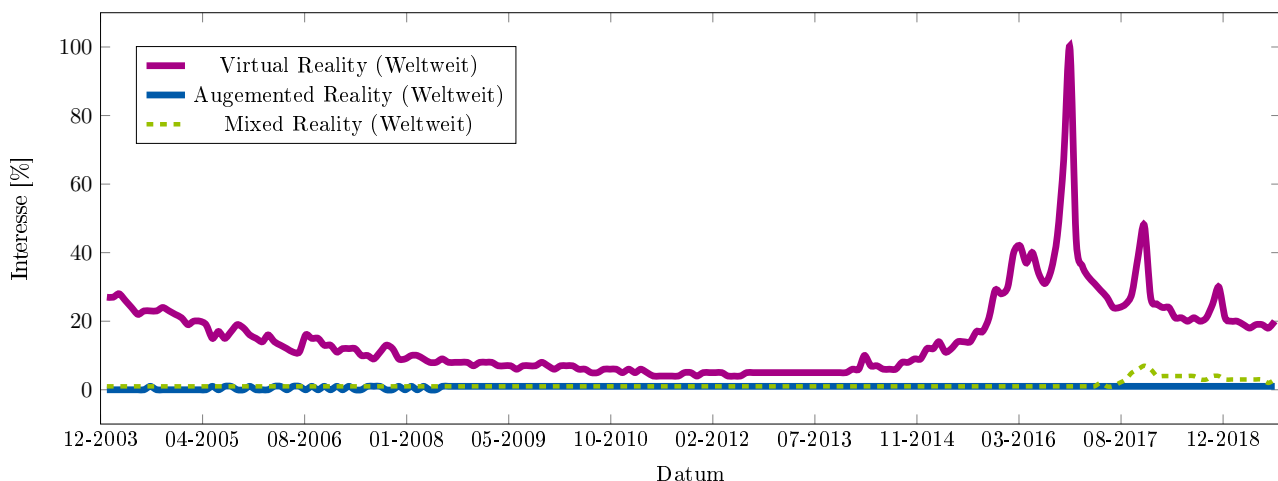


Abbildung 1-1: Google Trend¹ von VR, AR & MR (Eigene Darstellung in Anlehnung an [119])

Da die Entwicklung von VR mit der Erforschung von Sutherland [297] die älteste ist, ist wie zu erwarten dieses Thema am Bekanntesten und somit das Interesse in diesem Bereich am Höchsten. Zu dem gleichen Ergebnis kommen Wang et al. [340] als sie alle Veröffentlichungen vom Einsatz der VR in digitalen Ingenieurmethoden in den Jahren 1997 bis 2017 analysierten und dies in [341] für AR wiederholten. Die Bestrebung moderne Anwendungen mit VR und AR umzusetzen und damit Probleme der Ingenieure und Ingenieurinnen zu lösen, ist vorhanden und wird in Unternehmen immer weiterentwickelt und eingesetzt. Zabel et al. [357] stellten in einer Studie zu VR, AR und MR im Bundesland Nordrheinwestfalen

¹ Zahlen basieren auf den Google Suchanfragen im Zeitraum vom 01.01.2004 bis 31.05.2019. Diese wurden unter <https://trends.google.de/trends/> mit den Stichwörtern *Virtual Reality*, *Augmented Reality* & *Mixed Reality* im weltweiten Vergleich abgefragt. [119]

fest, dass die Zunahme von Investitionskosten für Software und Hardware stetig wächst und im Jahre 2020 bei circa 841 Millionen Euro liegen wird (siehe Abbildung 1-2). Hiervon entspricht ein geschätzter Anteil von 16 % den Ingenieurwissenschaften und 34 % der Architektur. Dieses klare Interesse und eingesetzte monetäre Volumen motivieren um die einzelnen Technologien und deren Möglichkeiten sowie Grenzen genauer zu betrachten.

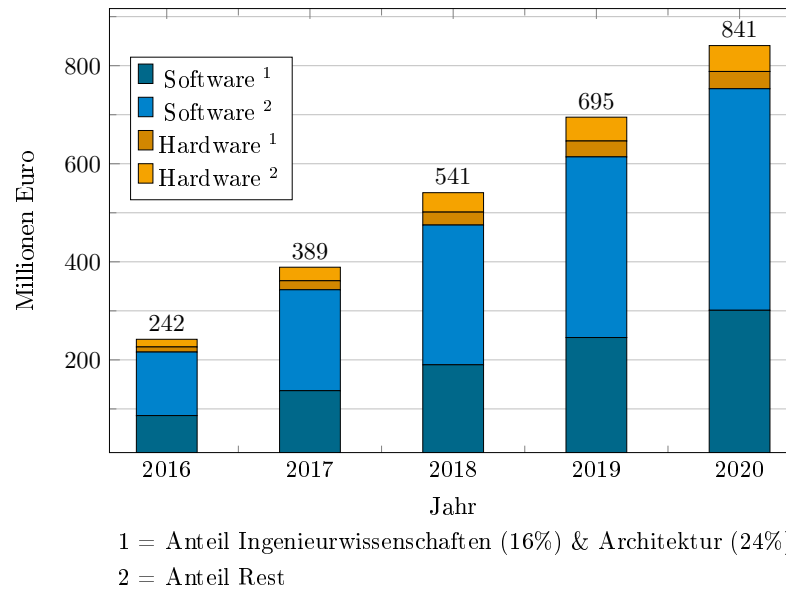


Abbildung 1-2: Investitionskosten von VR, AR & MR
(Eigene Darstellung in Anlehnung an [97], [227], [357])

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es wesentliche Fragen betreffend der neuen Technologien VR, AR und Mixed-Reality in Kombination mit Ingenieur Anwendungen zu beantworten. Es soll festgestellt werden wie diese Technologien im Ingenieurkontext eingesetzt und verwendet werden können. Dabei sollen die Möglichkeiten, Potentiale und Grenzen vergleichbar aufgezeigt werden. Zum einen soll diese Arbeit die genannten Technologien definieren, in die bereits vorhandenen, beispielsweise 3D-Anwendungen, einsortieren und Potenziale sowie Grenzen aufzeigen. Dabei sollen unterschiedliche Formen der interaktiven immersiven Visualisierung klar ersichtlich und verschiedene Nutzungsformen aufgezählt werden. Anschließend gilt es die Frage zu beantworten, wie die unterschiedlichen Technologieformen gemessen, bewertet und miteinander verglichen werden können. Es gilt eine eindeutige Abgrenzung und Bewertung verschiedener Anwendungen und Bereiche zu erarbeiten, um zukünftig Applikationen und Entwicklungen in Forschung und Implementierung klar voneinander abgrenzen und/oder die Rahmenbedingungen dieser klar herausarbeiten und festlegen zu können. Diese Bewertung soll durch einen Vergleichsparameter - hier bezeichnet als Pan-Faktor - durchgeführt werden (siehe Abbildung 1-3 unten links). Basierend auf der Analyse bestehender Anwendungen (siehe Abbildung 1-3 oben), dem hier entwickelten Vergleichsparameter ($\hat{=}$ Pan-Faktor) und der eindeutigen Definition der Umsetzungsformen der neuen Technologien soll eine Handlungsempfehlung Ziel dieser Arbeit sein. Die Empfehlung - hier als HEL.P bezeichnet - soll helfen Machbarkeitsstudien für Ingenieur Anwendungen in den Bereichen Ausbildung bzw. Training, Pla-

nung, Ausführung und Betrieb im Bau- und Umweltwesen zu generieren und mögliche Funktionalitäten in den Kontext zu bereits existierenden Anwendungen zu bringen (siehe Abbildung 1-3 unten rechts). Die entwickelte Vergleichbarkeit soll die kommenden Innovationen unterstützen, Abgrenzungen vereinfachen und weitere Möglichkeiten zur Ideenfindung liefern.

Es gilt in dieser Arbeit einen Vergleichsparameter für Ingenieure und Ingenieurinnen zu entwickeln, der innerhalb der Digitalen Realität zum Vergleich und darauf aufbauend für eine Handlungsempfehlung als Grundlage zur Implementierung einer Ingenieur Anwendungen dient.



Abbildung 1-3: Ziel der Arbeit mit Pan-Faktor & HEL.P. als Werkzeuge für Ingenieure und Ingenieurinnen

1.3 Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit ist in die Abschnitte Grundlagen, Analyse, Konzeptionierung, Umsetzung, Validierung, Fazit, Diskussion und Zusammenfassung unterteilt. Im ersten Abschnitt (siehe Kapitel 2) sollen die Grundlagen in Bezug auf die menschliche Wahrnehmung und die technische Repräsentation zur Reizung dieser Wahrnehmung aufgezeigt werden. Dabei wird die Funktionsweise der menschlichen Wahrnehmung in einer natürlichen Umgebung kurz erläutert und mögliche Hardwarekomponenten mit ihren Möglichkeiten und Grenzen aufgezeigt, um die menschliche Wahrnehmung zu reizen. Des Weiteren werden die grundlegenden Begriffe der Immersion, Präsenz und damit einhergehend der natürlichen und künstlichen Realität erläutert und voneinander abgegrenzt. Anschließend wird der Begriff der Digitalen Realität eingeführt

und bisherige und neue Technologien eingeordnet (siehe Kapitel 3.1). In einer Analyse werden bestehende Ingenieur Anwendungen und Ergebnisse aus Untersuchungen in den verschiedenen Bereichen der Ausbildung bzw. Training, Planung, Ausführung und Betrieb im Bau- und Umweltwesen erläutert und aufgezählt (siehe Kapitel 3.2).

Mit diesen Grundlagen und der Analyse wird im dritten Abschnitt ein Konzept zur Messung und des Vergleichs verschiedener Anwendungen der Digitalen Realität namens **Pan-Faktor** vorgestellt (siehe Kapitel 4.2). Basierend auf diesem Faktor wird das Konzept zur Erstellung der Handlungsempfehlung für Ingenieure und Ingenieurinnen beschrieben (siehe Kapitel 4.3). Sowohl der Pan-Faktor (siehe Kapitel 5.1) als auch die Handlungsempfehlung (siehe Kapitel 5.3) werden im vierten Abschnitt der Umsetzung als Excel-Tabelle bzw. interaktive Webseite implementiert. Mittels dieser Implementierung werden bestehende Anwendungen erfasst und bewertet, wodurch eine vergleichende Skala entstehen kann.

Über objektive Tests werden die umgesetzten Konzepte verifiziert. Basierend der Beispielanwendung VR4Teach kann die Handlungsempfehlung und der Pan-Faktor im Abschnitt der Validierung überprüft und verifiziert werden (siehe Kapitel 6). Die Ergebnisse dieser Validierung münden in einem Fazit was mit einer Diskussion abgeschlossen wird. Am Ende dieser Arbeit wird diese zusammengefasst und über weiterführende Möglichkeiten basierend auf den Ergebnissen ein Ausblick gewährt (siehe Kapitel 8).

Im Anhang finden sich die Aufzählung und der Vergleich aller bewerteten Ingenieur Anwendungen der Digitalen Realität (siehe Tabelle A-11), sowie aller Hardwarekomponenten zur künstlichen Reizung der menschlichen Wahrnehmung (siehe Tabelle A-1 ff.). Am Ende sind die Ergebnisse der Umsetzung einer Handlungsempfehlung beigefügt, um einen Einblick in das implementierte Konzept und dessen Resultat zu gewährleisten.



2 Grundlagen zur immersiven Wahrnehmung

„Die Wirklichkeit ist eine Illusion, dafür allerdings eine sehr hartnäckige.“ - Albert Einstein

In diesem Kapitel werden die Grundlagen für die menschliche Wahrnehmung erläutert und erklärt wie Immersion und das Gefühl von Präsenz entsteht. Es werden Technologien zur Umsetzung künstlicher Methoden bzw. zur künstlichen Illusion und deren aktuellen technologischen Grenzen bzw. Abweichungen zur Natur aufgezeigt.

2.1 Menschliche Wahrnehmung - Bespielen der Sinne

Der Begriff Wahrnehmung beschreibt den Vorgang und das Ergebnis einer Reizverarbeitung. Diese Reize werden über verschiedene Sinne von der Umwelt aufgenommen und im Gehirn verarbeitet. Es bildet sich ein Bild bzw. eine Empfindung der erlebten Reize. Die Wahrnehmung ist abhängig von persönlichen Erfahrungen, Konditionierung und Emotionen. Es findet also durch die Umwelt eine objektive Reizung statt gekoppelt mit einer subjektiven Reizverarbeitung, welche zum Ergebnis ein für den Reiz ausgelegtes Ergebnis liefert. Der menschliche Körper kann nicht auf alle Reize eingehen, diese wahrnehmen und verarbeiten wie z. B. Ultraviolettes Licht. Es sind also durch den menschlichen Körper in der natürlichen Realität Grenzen vorgegeben, die nicht überschritten werden können. Es ist allerdings möglich Reize künstlich zu erzeugen und damit bestimmte Ergebnisse im Menschen hervorzubringen. Diese Reize können chemischen, elektronischen oder physischen Ursprungs sein.

Im Bereich der Computertechnologie wird eine künstliche Reizung genutzt, um die Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine möglichst natürlich und intuitiv zu gestalten. Um mit Computern in jeglicher Form interagieren zu können, sind Reize in Form von Bildern oder Ton nötig. Andernfalls wäre es nicht denkbar diese Technologie zu nutzen.

2.1.1 Grundbegriffe der natürlichen und künstlichen Realität

Um von Vorhinein eine Verwirrung des Begriffs Realität zu vermeiden, wird innerhalb dieser Arbeit dieser in die Bereiche natürliche, künstliche Realität und Digitale Realität aufgeteilt. Die natürliche Realität entspricht der von uns Menschen wahrgenommenen Reizung über die natürliche Umgebung (siehe Abbildung 2-1 äußerer Kreis) [52], [67], [151]. Die Reizung und Interaktion mit Gegenständen, Umgebung und dem eigenen Körper mit allen vorhandenen Sinnen ist ein Teil der natürlichen Realität. Daneben ist die Reizung mit künstlichen vorwiegend in dieser Arbeit elektronischen und digitalen Hardwarekomponenten wie beispielsweise Bildschirmmonitore, Hand-Controller u.ä. Bestandteil der künstlichen Realität. In dieser künstlichen Realität findet sich eine künstliche meist als virtuell beschriebene Umgebung, diese kann aber auch in nicht digitaler Form z. B. als Modellbau, Literatur, u.ä. vorliegen (siehe Abbildung 2-1 mittlerer Kreis). Ist die künstliche Realität ausschließlich digital und innerhalb von Computern durchgeführt, wird dies in dieser Arbeit als Digitale Realität bezeichnet (siehe Abbildung 2-1

innerer Kreis). In digitaler Form findet die Digitale Realität in einer virtuellen Umgebung, im englischen als Virtual Environment bezeichnet, statt und entspricht der virtuellen Welt im Rechner. Diese Umgebung muss nicht zwangsläufig mehrdimensional und visuell aufbereitet sein. In der Digitalen Realität sind die Technologie- bzw. Medienformen der VR, AR und Mixed-Reality zu finden (siehe Abbildung 2-1 innerer Kreis).

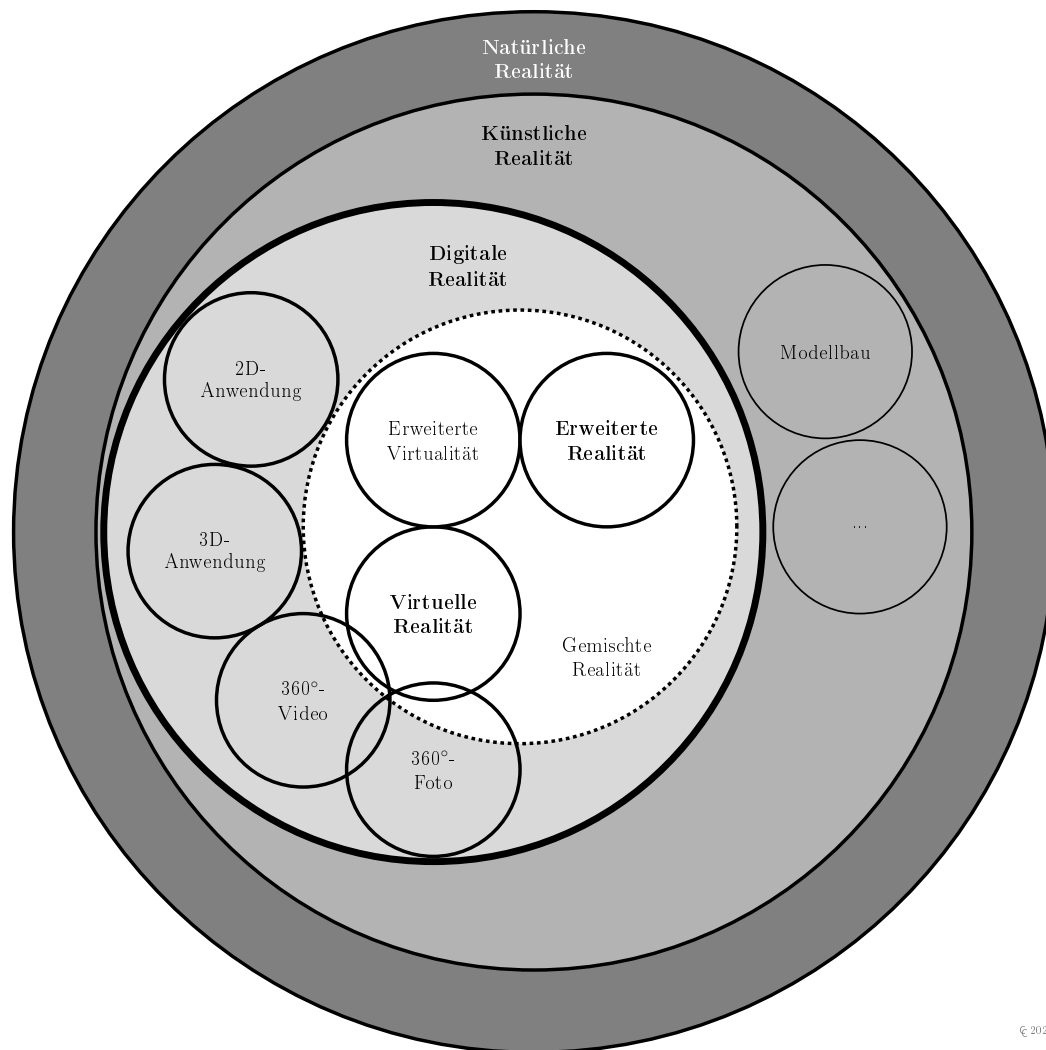


Abbildung 2-1: Übersicht der Realitätsformen & Technologien der Digitalen Realität

2.1.2 Visuelle Wahrnehmung

Visualisierung kommt vom lateinischen *visualis* und wird als „zum Sehen gehörend“ übersetzt [28]. Dies bedeutet, dass man einen bestimmten Kontext ansprechend über den Weg des Sehens vermitteln möchte. In der visuellen Wahrnehmung wird der Sehsinn des Auges genutzt und mit Lichtimpulsen gereizt. Licht wird in unterschiedlichen Wellenlängen durch die Pupille auf die Netzhaut im Auge geführt, wo die Energie über spezielle Rezeptoren verarbeitet und an das Gehirn weitergeleitet wird. Die Rezeptoren auf der Netzhaut unterscheiden sich zwischen farbempfindlichen und farbungempfindlichen. Es gibt circa 132 Millionen Sensoren, von denen circa 7 Millionen farbempfindlich sind. Menschen können ausschließlich

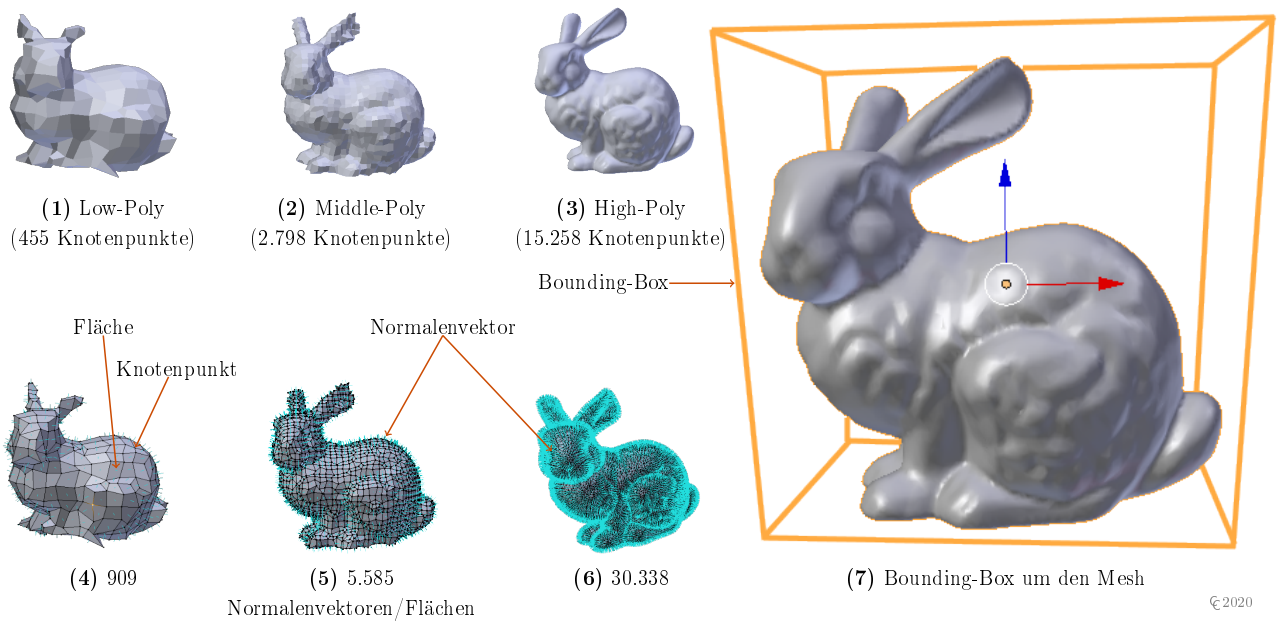
über das Auge Licht in Form von Bildern wahrnehmen. Jedes Objekt, welches Licht reflektieren kann oder selbst Licht ausstrahlt kann dadurch vom Menschen in unterschiedlichen Farben und Intensität wahrgenommen werden. Die menschliche Wahrnehmung ermöglicht die Aufnahme von Lichtwellen zwischen 400 und 760 nm. Die Lichtstärke, die ein Mensch wahrnimmt, liegt bei 10^{-3} bis 10^5cd/m^2 was dem Nacht- bis Tageslicht entspricht. [34], [52]

Die visuelle Wahrnehmung künstlich nachzubilden und für den Menschen somit Abbilder zu erschaffen, ist die älteste Form der Kunst und künstlichen Wahrnehmung. Bereits in der Steinzeit wurden mittels Höhlenmalerei künstliche Bilder als Illusionen von etwas, das sich aktuell nicht an diesem Ort befindet, erschaffen. Mit der Fotografie im Jahr 1838, dem Fernseher im Jahr 1928 und den ersten Computer im Jahre 1941 wurde diese Form der Abbildung zunehmend technisiert und mit bewegten Bildern die Illusion zusätzlich vergrößert [23], [33], [157], [334]. Das aktuelle Ergebnis dieser digitalen Transformation findet sich auf jedem LCD-Monitor, welcher seit 2001 als Standard für Bildschirme verwendet wird [33].

i) Technische Herausforderungen

Obwohl die Übertragung der visuellen Wahrnehmung auf künstliche und technische Komponenten im Vergleich zu den anderen Wahrnehmungsformen am frühesten begonnen hat, unterliegt diese Technik immer noch der natürlichen Wahrnehmung und Reizung. Die Herausforderungen ist es Objekte und Umgebung in der gleichen Detaillierung, Farbgebung, Textur und Lichtreflexion ähnlich der natürlichen Repräsentation abzubilden. Um Objekten und Umgebung einen realistischen Anblick zu geben, reicht es nicht eine 2D-Darstellung umzusetzen. Erst durch künstliche Effekte oder 3D-Darstellungen werden die Objekte plastisch und für die menschlich subjektive Wahrnehmungsverarbeitung realistisch. Um die Detailstufe der Objekte im Computer darzustellen werden mittels Triangulation immer feinere künstliche Netze bestehend aus Drei- oder einfachen Vielecken geschaffen. Die triangulierten Netze können performant vom Computer gelesen und angezeigt werden. Man spricht vom Rendering. Die triangulierten Objekte nennen sich **Mesh**. Eine Abbildung in Form von Kreisen bzw. Kugeln ist rechentechnisch nicht möglich. Eine Rundung bildet sich deshalb aus einer feineren Struktur im Netz bzw. einer höheren Anzahl von Polygonen. Die Detailstufe auch Level of Detail (LOD) genannt wird im Graphik-Bereich in den Stufen High-, Middle- und Low-Poly eingeteilt. In Abbildung 2-2 wird anhand des Stanford-Hasen verdeutlicht wie sich die unterschiedlichen LODs auf das Erscheinungsbild auswirken. Der Stanford-Hase wird meist für den Vergleich von graphischen Darstellungen in unterschiedlichen Ansichtsfenstern oder Programmen sowie deren graphische Performanz verwendet [290]. Low-Poly stellt die einfachste Form dar und unterscheidet sich wesentlich durch die geringere Anzahl an Polygonen von seiner Konkurrenz (siehe Abbildung 2-2 (1)). Umso mehr Polygone im Mesh vorhanden sind, desto feiner ist dessen Erscheinungsbild (siehe Abbildung 2-2 (3)). Allerdings wird dabei auch zunehmend die benötigte Rechenleistung größer, weshalb in der Spielindustrie oder CAD-Systemen oftmals für mathematische Berechnungen wie Kollisionen mit vereinfachten Bounding-Boxen gerechnet wird. Die Bounding-Boxen werden durch einfache Geometrien z. B. Quader, Zylinder, u.ä. repräsentiert (siehe Abbildung 2-2 (7)). Dabei beschreiben sie die maximalen Ausmaße des abzubildenden Gegenstandes und stellen damit den physikalischen Körper dar.

Meshbildung anhand des Stanford-Hasen



© 2020

Abbildung 2-2: Vergleich von High-Poly, Middle-Poly & Low-Poly
(Eigene Darstellung in Anlehnung an [290])

Nicht nur das geometrisch detailreiche Abbild ist eine technische Herausforderung, sondern auch die Textur bestehend aus der Farbgebung der digitalen Objekte bzw. Umgebung sowie der Schattierung und Reflexion. Wie bereits erwähnt ist es möglich das Licht in einem Wellenspektrum von 400 bis 760 nm über das menschliche Auge wahrzunehmen. Dies umspannt einen Farbraum aus den Primärfarben blau über grün zu rot. Farben werden technisch über einzelne Pixel wiedergeben, welche bestimmte Farbwerte einnehmen können. Diese Werte werden über beispielsweise das RGB-System, CMY- oder CMYK-System, HSB- oder HSL-System dargestellt. Bei der CMY- oder CMYK-Farbgebung handelt es sich um eine subtraktive Farbmischung, die auf den drei Primärfarben Cyan, Magenta, Yellow (dt. Gelb) und Black (dt. Schwarz) basiert. Meist wird dies bei der Übersetzung von digitalen Farben zu realen Farben im Drucker verwendet. Das HSB- oder HSL-System liefert die Farben über den Farbton (engl. Hue), die Sättigung (engl. Saturation) und Helligkeit (engl. Brightness bzw. Lightness). Mit Hinzufügen der Komponenten Sättigung und Helligkeit können Farbübergänge kleiner und somit weicher und natürlicher umgesetzt werden. Der Unterschied beider Systeme liegt im Farbraum, welcher den entsprechenden Farbton wiedergibt. Der Farbraum wird ähnlich dem CMY-System in drei Komponenten dem rot-, grün- und blau-Anteil angezeigt. Dieses System heißt auch RGB-Farbsystem und ist das Ursprungsmodell zur Farbgebung am Computermonitor. Dieser Farbraum wurde im Laufe der Zeit erweitert und so entstanden aufbauende Farbräume wie Adobe RGB, sRGB oder Wide Gamut RGB (siehe Abbildung 2-3 links). Diese Systeme mit der aktuellen Hardware spiegeln aber nur einen Bruchteil der realen Farben wider, die das menschliche Auge tatsächlich im natürlichen Umfeld wahrnehmen kann. 1976 setzte sich noch ein weiteres System zur Beschreibung der natürlichen Farbgebung, das sogenannte Commission Internationale d'Eclairage (CIE) Lab-System, durch. Der große Unterschied beruht darauf, dass es geräteunabhängig eingesetzt werden kann. Dafür wird meist die Farbkomponente umgerechnet und angezeigt. So wird sichergestellt, dass Abbildungen auf Fotos, Bildschirmen und Druckern identisch sind. Die Lab-Farben

werden ebenfalls von drei Faktoren bestimmt. Diese sind die Helligkeitskomponente ($\hat{=}$ L), der Wert von Grün bis Rot ($\hat{=}$ a) und der Wert von Blau bis Gelb ($\hat{=}$ b). Die a- und b-Komponente kann Werte zwischen -128 und 127 annehmen, die Helligkeit dagegen Werte 0 ($\hat{=}$ schwarz) bis 100 ($\hat{=}$ weiß). Mathematisch gesehen ergibt sich daraus ein kugelförmiger Farbraum, der durch das CIE mittels einer Transformation und Schnitt zu einem kegelförmigen 2D-Graphen gewandelt wurde. Dieser findet sich als Standard heutzutage bei allen Monitoren und visuellen Abspielgeräten zur Anzeige des möglichen Farbraums wieder. In Abbildung 2-3 links wurde dieser CIE Lab-Farbraum verwendet, um deutlich zu machen wie die abbildbaren Farbräume im Vergleich zu realen Farbspektren aussehen. Zu betonen ist dabei, dass die fließende Farbschattierung innerhalb des Kegels einen rein optischen Informationsgehalt besitzt, da wie durch die vorherige Erläuterung die exakten Farben nicht dargestellt werden können. Durch Abbildung 2-3 links wird deutlich welchen Farbraum das RGB-System als Basis vieler weiterer Systeme einnimmt. Andere Farbräume wie Adobe RGB oder Wide Gamut RGB bilden einen größeren Bereich ab, allerdings kann kein vom Computer abgebildetes System die vollständige menschliche Wahrnehmung im visuellen Kontext abbilden [34], [52], [257].

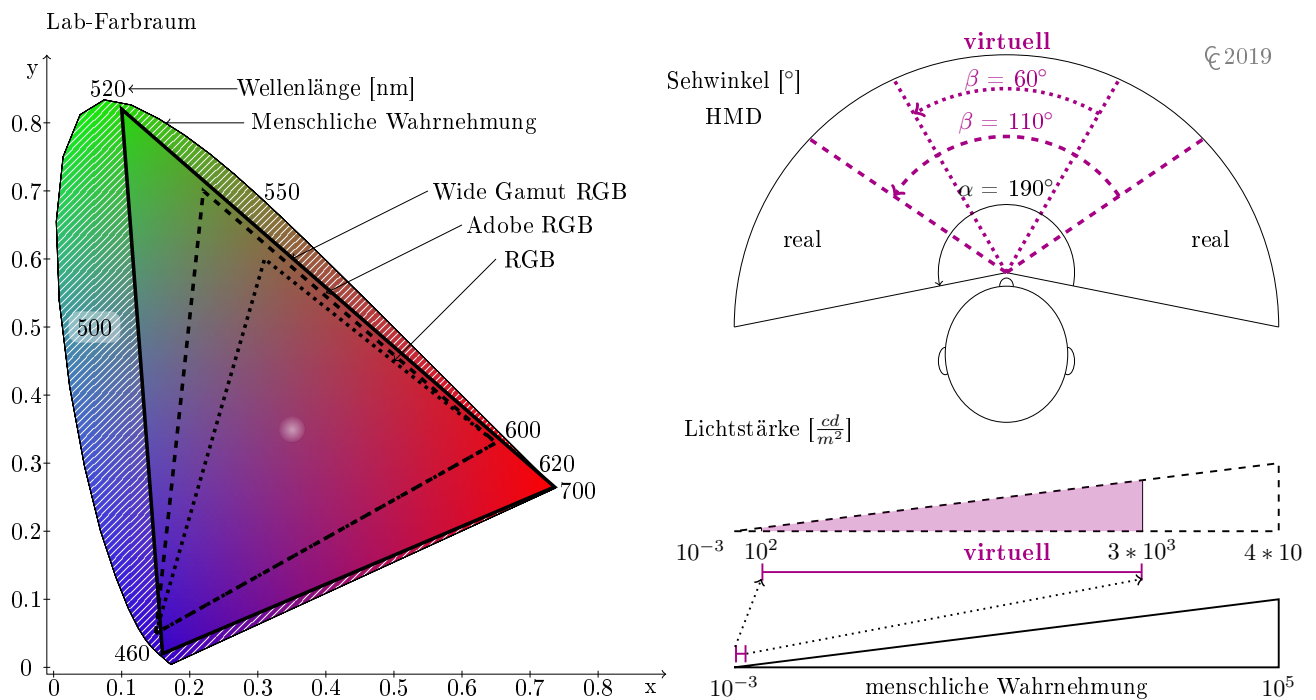


Abbildung 2-3: Vergleich der technologischen visuellen Möglichkeiten mit der realen Wahrnehmung (Eigene Darstellung in Anlehnung an Tabelle A-1 & [34], [52], [257])

Ähnlich ist es mit der Aufnahme der natürlichen Helligkeit, diese umfasst mit 10^{-3} bis 10^5 cd/m^2 ein sehr weites Spektrum [275]. Candela cd steht hierbei für Lichtstärke und cd/m^2 gibt die Leuchtdichte an, mit der angegeben wird, wie hell das menschliche Auge eine beleuchtete Fläche wahrnimmt. Die durch den Menschen ausreichende Helligkeit, um Flächen zu detektieren, reicht vom Nachthimmel bis zum Tageslicht bei einem zentralen Sonnenstand. Dabei gibt es Helligkeitsstufen wie die direkte Sonne zur Mittagszeit, welche unsere Wahrnehmung übersteigen und sich meist durch Überlastung der Rezeptoren - weiße Flecken auf der Netzhaut - widerspiegeln. Die Sonne zur Mittagssonne hat eine Leuchtdichte von unge-

fähr $1,6 \times 10^8 \text{ cd/m}^2$. Licht ist ein sehr facettenreiches und komplexes physikalisches Phänomen. Monitore und Fernseher können davon allerdings kaum etwas wiedergeben und so sind Lichtsimulationen und Reflexionen nur durch weitere Tricks als realistisch zu betrachten (siehe Abbildung 2-3 rechts unten). Die künstliche Abbildung der Leuchtdichte über Monitore und Fernseher beträgt 10^2 bis $3 \times 10^3 \text{ cd/m}^2$, wobei das Maximum von 3.000 cd/m^2 nur bei sehr wenigen Spezial-Bildschirmen umgesetzt wird und man standardmäßig von 200 bis 400 cd/m^2 ausgehen sollte. Im Bereich der visuellen Wahrnehmung schafft damit die künstliche Umsetzung von Licht bzw. Lichtverhältnissen den größten Unterschied zur natürlichen Realität.



Abbildung 2-4: Textur und Material zur realistischen Gestaltung von Objekten

Licht spielt allerdings auch für die Herausforderungen von Schatten und Reflexion eine wichtige Rolle. Diese Phänomene schaffen einen großen Realitätsbezug, da künstliche Gegenstände und Umgebungen bzw. ihr Verhalten realistischer aussehen. Zur Berechnung werden Bounding-Boxen (siehe Abbildung 2-2 (7)) verwendet oder Ergebnisse bereits vor der Anwendung gerechnet und nur noch angezeigt bzw. abgespielt. Schattenbildungen werden meist über Strahlenberechnungen umgesetzt und die Intensität abhängig der Stärke der Lichtquelle festgelegt. Reflexionen werden ähnlich ermittelt, wobei die Eigenschaften der Textur hinzukommen. Texturen beschreiben die Oberfläche der künstlichen Gegenstände bzw. Umgebung. Zum einen bestehen diese aus der bereits beschriebenen Farbgebung und deren Anordnung z. B. als Bild (siehe Abbildung 2-4 (1)). Zum anderen aber auch aus der genauen Beschreibung von Höhen und Tiefen der Struktur über Normalenvektoren. Normalvektoren zeigen in die orthogonale

Richtung einer Fläche und geben dadurch die Richtung der Reflexion wieder (siehe Abbildung 2-2 (4-6) & Abbildung 2-4 (2) & (4)). Die Normalenvektoren ermöglichen ein realistisches Abbilden von Materialien. Materialien sind Texturen, die auf einen 3D-Körper projiziert werden und meist noch erweiternde Eigenschaften zum optischen Verhalten wie Transparenz, Metalleffekte, Reflexion, u.ä. besitzen. Im direkten Vergleich von Abbildung 2-4 (3) und Abbildung 2-4 (4) fällt auf, dass durch die Normalen eine Lichtreflexion möglich ist, die den Baumstumpf realer wirken lassen. Abbildung 2-4 (3) ist ein Material welches ausschließlich auf der Textur in Abbildung 2-4 (1) besteht, wohingegen Abbildung 2-4 (4) zusätzlich die Informationen der Normalen aus Abbildung 2-4 (2) enthält.

Wie hier beschrieben ist es möglich real wirkende Objekte mit Hilfe künstlicher und digitaler Methoden darzustellen. Allerdings bestehen in einigen Bereichen wie Licht und Sehwinkel noch große Abweichungen zur natürlichen Realität (siehe Abbildung 2-3 oben rechts).

ii) Hardwarelösungen

Um innerhalb der digitalen Technologien wie Fernseher, Computer, VR-Systeme, u.ä. die visuelle Wahrnehmung zu bespielen, muss mit Hilfe von Hardware ein künstliches Bild erschaffen werden. Dies geschieht aktuell meist über Liquid Crystal Display (LCD) (dt. Flüssigkristallanzeige), organisch Licht-Emittierende Diode (OLED)-Monitoren oder Videoprojektoren, die alle auf der LED-Technologie basieren und diese unterschiedlich einsetzen. Unabhängig der zugrundeliegenden Hardware haben sich in der Literatur allgemeine Grundtypen der verschiedenen Displayarten herauskristallisiert. In Abbildung 2-5 wird deutlich, dass die Hauptgruppen der visuellen Displays das World-Fixed-Display (dt. Statische Bildschirmanzeigen) und On-Body-Display (dt. Am Körper getragene Bildschirme) umfassen.

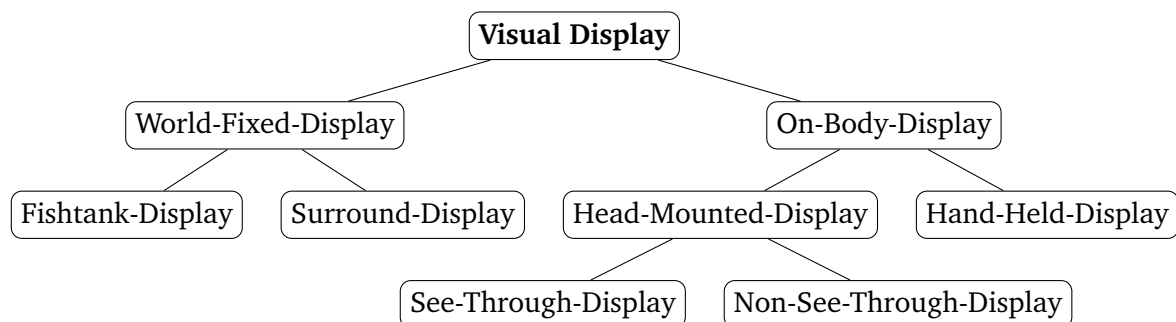


Abbildung 2-5: Technische Möglichkeiten der visuellen Displays
(Eigene Darstellung in Anlehnung an [50], [67], [151], [275])

World-Fixed-Displays machen im Bereich der visuellen Wahrnehmung den größten Anteil aus und beinhalten feststehende oder fixierte LCD-Monitore, sowie Videoprojektoren aus der Computer-, und Fernsehindustrie. Einfach gesagt kann man alle im Raum befestigten Monitore oder Leinwände dieser Kategorie zuordnen. Neben der gängigen Bezeichnung World-Fixed-Display findet sich auch oft die Namensgebung Stationary-Display (dt. Stationärer Bildschirm). Die visuellen Displays im Bereich der World-Fixed-Displays unterscheiden sich im Wesentlichen in der Größe der Projektionsfläche und dem Anwendungsbereich (FOR). Ist diese wie bei einem Computer-Monitor üblich auf eine kleine Fläche beschränkt wird diese als Fishtank- (dt. Aquarium) oder auch Monitor-based (dt. Bildschirmbasierend)-

Display bezeichnet (siehe Abbildung 2-6 (1)) [151], [275]. Diese Form der Monitore füllen nur in einem kleinen Rahmen einen Raum und die nutzende Person blickt, ähnlich wie durch ein Aquarium, direkt auf die gezeigte Anwendung. Wird die Projektion allerdings auf den Raum in Teilen oder vollständig erweitert, handelt es sich um Surround-Displays [50], [67], [151], [275]. In einer sogenannten Cave Automatic Virtual Environment (CAVE) werden über Bildschirme oder Beamer virtuelle Bilder auf mindestens drei bis hin zu sechs Wandseiten projiziert (siehe Abbildung 2-6 (2)) [68]. Neben der CAVE gibt es mit abgerundeten Projektionsflächen und somit einem fließenden Übergang der Wandseiten auch die sogenannte Wave [275]. Bei dieser soll die Akzeptanz durch einen höheren räumlichen Eindruck größer sein als bei der traditionellen CAVE [275].

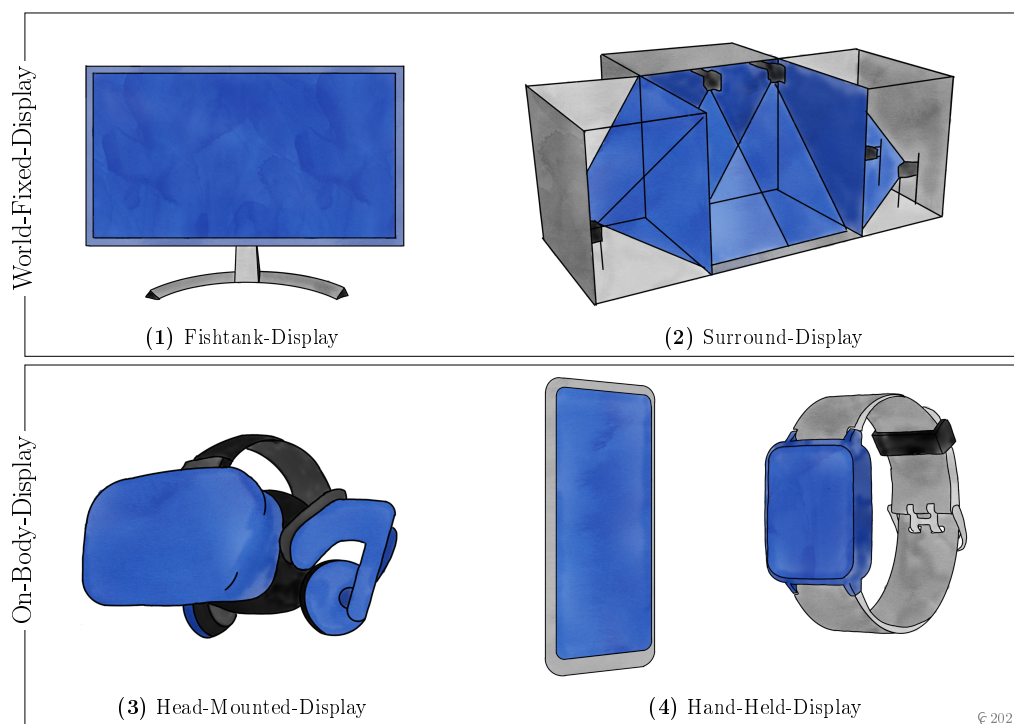


Abbildung 2-6: Beispiele zur Hardwarelösung der visuellen Displays (Eigene Darstellung in Anlehnung an [64], [327])

Ein räumlicher Eindruck entsteht durch die Verwendung der Stereoskopie-Technik. Bereits 1915 wurde dies eingesetzt, um gemalte oder später fotografierte Abbildung mit einem plastischen oder 3D-Effekt zu versehen [261]. Stereoskopie wird teilweise ebenfalls bei den Bildschirmen im Bereich der On-Body-Display, die am oder durch den Körper getragen werden, verwendet. Das besondere dieser Displayart ist, dass sich die LCD-Monitore mit dem Nutzenden mitbewegen oder mitgeführt werden. Visuelle Displays, die in Form von Brillen oder Helmen am Kopf befestigt werden, nennen sich Head-Mounted-Display (dt. Kopf getragene Bildschirme) (siehe Abbildung 2-6 (3)), diese werden manchmal auch als Head-Based-Displays [275] oder Head-Worn Displays [111] bezeichnet und wurden bereits Anfang des 19. Jahrhunderts patentiert, aber erst von Sutherland [297] 1968 mit einer Beispielanwendung erfolgreich umgesetzt. Die Herausforderung dieser Technik liegt dabei am komfortablen Mitführen, Gewicht, Größe und der freie Bewegungsradius im Gegensatz zur Leistung, die diese Bildschirme mit sich bringen.

Das erste Head-Mounted-Display 1968 ermöglichte zwar eine direkte Einblendung von digitalen Elementen, schränkte aber die Bewegung auf eine 360°-Drehung ein [67], [297]. Erst in den letzten zehn Jahren wurden die Hardware kompakt, leistungsstark und die Verbindungen über Kabel und Kabellos nahezu frei von Verzögerung sprich Latenz. Diese Entwicklung ermöglicht die große Anzahl an Head-Mounted-Display-Lösungen, die es nun auch bereits für unter 500 € auf dem Markt zu kaufen gibt. Eine ausführliche Vergleichstabelle findet sich auch im Anhang in der Tabelle A-1. Diese unterscheiden sich meist in der Auflösung, der Größe des Sichtfeldes und der Bildwiederholungsrate. Die Auflösung beschreibt die Pixeldichte, welche als Schärfe des Bildes wahrgenommen wird. In den neuesten Monitoren finden sich bereits 8k-Auflösungen, was einer Dichte an Bildpunkten von 8.192 x 4.320 entspricht. Dies kann über Head-Mounted-Displays noch nicht erreicht werden und beschränkt sich maximal auf eine HD-Auflösung (1.920 x 1.080). Die dadurch anfallenden unscharfen Konturen fallen besonders auf, da die Bildschirme wesentlich näher am Auge platziert sind. Das führt dazu, dass abgebildete Texte nicht scharf dargestellt werden und es somit schwer fällt diese problemlos lesen zu können [140].

Neben der Auflösung ist auch die Bildwiederholungsrate also die Frequenz, in der die Bilder auf dem Display angezeigt werden, sehr unterschiedlich. Für bewegte Bilder innerhalb von Videos gilt eine Wiederholungsrate von mindestens 24 oder 25 Hz, was 24 oder 25 Bilder pro Sekunde entspricht [10], [275]. Für hochauflösende Videos in Form von Blue-Rays hat sich mittlerweile der Standard von 60 Hz etabliert [275]. Dies übertrifft die menschliche maximal wahrnehmbare Frequenz von 40 bis 50 Hz [10]. Im Bereich der VR hat sich herausgestellt, dass eine zusätzlich höhere Frequenz Cybersickness (siehe Kapitel 2.3.5) vermeidet und den sogenannten Schlieren-Effekt vermindert. Der Schlieren-Effekt lässt das Bild in der menschlichen Wahrnehmung kurzzeitig stehen, wodurch bei Bewegung des Kopfes das Gefühl entsteht, das Bild mitzuziehen. Dieser Effekt führt sehr schnell zu Übelkeit. Deshalb hat sich der Standard von 90 Hz für VR-Systeme ergeben [275]. Allerdings können Head-Mounted-Displays, die unabhängig eines Computers sind wie z. B. Cardboards, diese Frequenz nicht zur Verfügung stellen.

Im Gegensatz zur Frequenz gibt es im Bereich des Sichtfeldes erhebliche Unterschiede für Head-Mounted-Displays. Im Bereich der AR-Technologie finden sich hier erst Winkel von maximal 50°. Diese Head-Mounted-Displays sind so genannte See-Through-Displays (dt. Display zum Durchschauen) ähnlich einer Brille. Die VR-Systeme mit ihren Non-See-Through-Displays bieten hier Sichtfelder von 120° an. Das natürliche Sichtfeld entspricht zwischen 180° und 200°, wodurch nur ein kleiner Teil des gesamten Sichtfeldes durch die Hardware umgesetzt werden kann (siehe Abbildung 2-3 oben rechts).

Neben den Head-Mounted-Displays gibt es in der Kategorie der On-Body-Display die Hand-Held-Displays (dt. Durch die Hand gehaltene Display). Dies umfasst Mobilcomputer wie Smartphones und Tablets mit ihren LCD-Displays (siehe Abbildung 2-6 (4)). Diese handlichen und dadurch tragbaren Geräte ermöglichen, dass diese frei mitgeführt werden können. In AR-Anwendungen wird dieses Display genutzt, um in der natürlichen Umgebung über die Kamera virtuelle Abbildungen darzustellen und anzuzeigen. Die Entwicklung dieser mobilen Displays und Mobilcomputern ist im letzten Jahrzehnt so rasant gewachsen, dass eine Aufzählung von Hardware nicht zielführend ist. Die Unterschiede zwischen den Geräten sind kaum noch greifbar und die Leistung und Auflösung wächst stetig.

Es lässt sich festhalten, dass im Bereich der visuellen Displays eine große Bandbreite an sehr unterschiedlichen Arten zur Anzeige virtueller Inhalte existiert. Jede Kategorie hat dabei ihre Vor- und Nachteile, wodurch sehr unterschiedliche Anwendungsbereiche umgesetzt werden können.

iii) Bekannte Auswirkungen und Kombinationseffekte

Die visuelle Wahrnehmung ist bekanntermaßen die dominanteste aller Sinneswahrnehmung [42]. Im Zweifel wird unter- und bewusst das visualisierte Abbild als real betrachtet und Reize anderer Sinne als nichtig angesehen. Dies kann unter Umständen zu negativen Folgen wie Übelkeit u.ä. führen (siehe Kapitel 2.3.5) und das Gefühl von Präsenz zerstören. Die bewusste falsche Visualisierung kann allerdings auch genutzt werden, um dem Menschen ein anderes Körpergefühl zu vermitteln und diesen somit zu einer bestimmten Handlung beispielsweise einer Bewegung zu zwingen [48]. Dabei muss die Bewegung in sich schlüssig sein, damit sie akzeptiert wird [48]. Dieser Effekt wird auch beim Redirect-Walking genutzt, indem dem Anwendenden eine größere oder kleinere virtuelle Rotation oder Translation vorgespielt wird, als in der natürlichen Umgebung vollzogen wurde [242]. Somit können künstlich kleine Bewegungsbereiche und natürliche Grenzen vergrößert werden. Die Visualisierung hat demnach über alle Sinne hinweg einen entscheidenden und maßgeblichen Einfluss auf die Interpretation und subjektive Wahrnehmung sowie das Körpergefühl. Man kann so weit gehen und sagen die visuelle Wahrnehmung ist der wichtigste Sinn und findet in der künstlichen Reizung die größte Aufmerksamkeit.

2.1.3 Auditive Wahrnehmung

Bei der auditiven Wahrnehmung werden Schallwellen, die durch Bewegung innerhalb eines Mediums z. B. Luft entstehen, im Ohr vom Trommelfell als Reiz übertragen. Basierend auf dem Druck der Schallwelle und der Frequenz der Schwingung des Trommelfells entstehen unterschiedliche Töne. Töne können vom Gehirn zu Klängen und Sound verknüpft und interpretiert werden. Der Mensch kann Töne von 20 bis 22.000 Hz im 3D-Raum hören [275]. Beispielsweise liegt die Frequenz mit der gesprochen wird bei 3.400 Hz (siehe Abbildung 2-7 dunkel grauer Bereich). Abhängig der Frequenz wird der Schalldruck durch den Menschen wahrgenommen. So ist bei geringer Frequenz der Schalldruck wesentlich höher als der gleiche Ton in einer höheren Frequenz (siehe Abbildung 2-7). Deshalb wird normalerweise bei Angaben zum Schalldruck eine Frequenz von 1.000 Hz festgeschrieben (siehe Normkurve in Abbildung 2-7). Für diesen Bereich kann der Mensch einen Schalldruck von 10 bis 130 dB bzw. <0.0002 -20 Pa wahrnehmen. Bei Drücken ab 120 dB sprich 20 Pa verursachen diese Schmerzen und Hörschäden. In der DIN ISO 226 [77] ist der nicht lineare Zusammenhang zwischen Frequenzen und Schalldruck festgehalten und in Abbildung 2-7 für relevanten Bereiche der menschlichen Wahrnehmung aufgetragen.

i) Technische Herausforderungen

Die Herausforderungen zur künstlichen Repräsentation von Ton und Sound liegt zum einen im komplexen Verhalten der Schallwellen. Sie sind abhängig der jeweiligen Dichte des Mediums, durch welche sie hindurch gehen bzw. welches sie durch den Schalldruck ebenfalls in Schwingung und Bewegung versetzen. So wird Schall innerhalb von Luft als Gas langsamer übertragen als in Wasser als Flüssigkeit. Je nach Medium werden demnach für die gleiche Schallquelle unterschiedliche Töne in Frequenz und Druck wahrnehmbar. Die auditive Wahrnehmung ist auf die Interpretation von Schall in der Luft spezialisiert und wird Klang und Ton hier als verständlich wahrgenommen. Schallwellen unterliegen zusätzlich Reflexionen und Reibungen mit sich und der Umgebung, wodurch es zu Überlagerungen, Interferenzen und

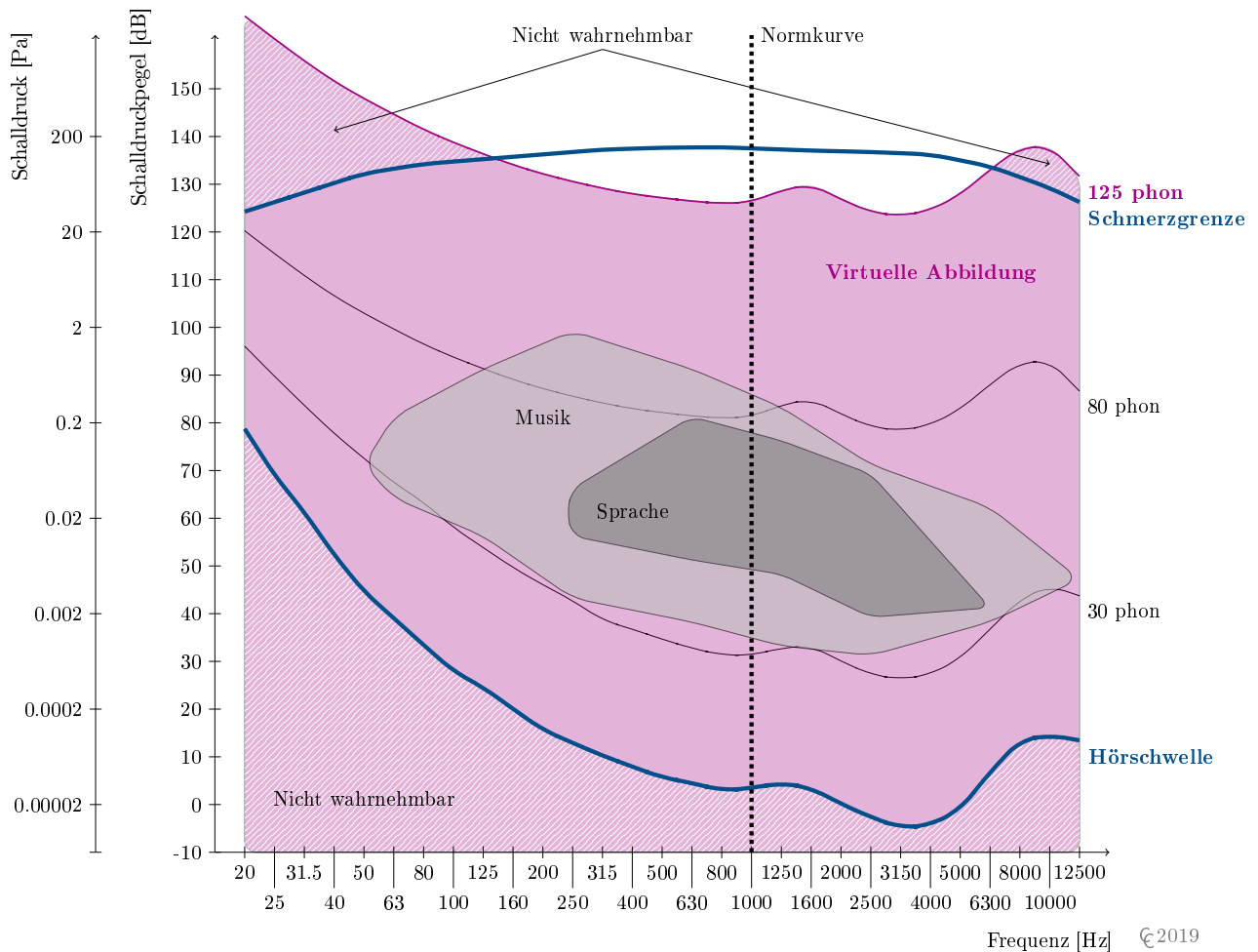


Abbildung 2-7: Vergleich der technologischen auditiven Möglichkeiten mit der realen Wahrnehmung (Eigene Darstellung in Anlehnung an Tabelle A-2, Tabelle A-3 & [77])

Absorptionen kommt. Schall breitet sich soweit aus bis dieser vollständig absorbiert ist. Er kann durch Überlagerungen verstärkt oder verändert werden. Interferenzen sowie Überlagerungen kommen auch innerhalb von Schallwellen vor, wenn diese sich aufgrund unterschiedlicher Schalldrücke oder Frequenzen treffen [275] oder durch die Reibung der schwingenden Partikel innerhalb des Mediums. Dadurch kann eine vollständige oder teilweise Adsorption auftreten. Schall ist also hochdynamisch, flexibel und individuell. Die menschliche Wahrnehmung kann mit diesen Einflüssen umgehen und die Bewegung und Richtung des Schallmitters detektieren. Man spricht davon, dass der Mensch ein räumliches Gehör besitzt.

Es existiert eine Schwierigkeit durch den großen Wahrnehmungsbereich von Druck und Frequenz, wie dieser in Abbildung 2-7 mittels der dicken blauen Linien verdeutlicht ist. Im grauen Bereich sind hierbei die Areale der Wahrnehmung von Sprache (dunkel grau) und Musik (hellgrau) verdeutlicht. Dabei entspricht dies der Standardisierung aus DIN EN ISO 226 [77]. Diese kann im Laufe eines Menschenlebens allerdings stark variieren, da im zunehmenden Alter die Grenzbereiche und somit die Wahrnehmung von sehr hohen und tiefen Tönen nicht mehr klar funktioniert.

ii) Hardwarelösungen

Die künstliche Repräsentation und Reizung mittels Schall als Ton und Sound ist die einzige künstliche Reizung, welche die menschliche Wahrnehmung übertrifft (siehe Abbildung 2-7). Aktuelle Lautsprechersysteme können die Frequenzen von 5 bis 50.000 Hz und einem Schalldruck von 125 dB und mehr abbilden und wiedergeben (siehe Tabelle A-2 & Tabelle A-3). Außerdem können über Hardwaresysteme, Positionierung oder softwareseitigen Einstellungen ein räumliches Klangbild geschaffen werden. Beispielsweise schafft das System von Dolby® namens Dolby Atmos® erstmalig eine theoretisch unbegrenzte Anzahl an Tonspuren [82]. Jede Tonspur kann einer anderen Quelle zugeordnet werden und anschließend auch in Überlagerung auf einem speziellen Lautsprecher individuell ausgegeben werden. Zusätzlich zu dieser Aufnahme- und Wiedergabequalität werden zahlreiche Lautsprecher (wie z. B. Front-, Surround- und Deckenlautsprechern) künstlich oder real platziert, um ein möglichst detailreichen Klangraum zu schaffen. Dieser Raum ermöglicht die Wahrnehmung von Tönen vor, hinter und über der eigenen Position, aber auch eine Präzision zur Erkennung ob einer der Soundquellen noch weiter oben ist als ein andere [82], [138]. Dolby Atmos® unterstützt dabei bis zu 34 Einzellautsprecher, welche unterschiedlich angeordnet werden können. Allerdings zeigt Lentz et al. [180], dass ein realistischer Sound, virtuell bearbeitet, bereits mit vier Lautsprechern einen wahrnehmbaren Surround-Sound erzeugt. Malyshev [192] zeigt die Möglichkeit auf, wie Sound in 360° und für jede Tonspur eine individuelle Amplitude, Frequenz und Wellenlänge aufgenommen werden kann. Somit ist die Aufnahme eines ausreichend detaillierten Schallereignisses gegeben. Ähnlich wie bei der visuellen Wahrnehmung unterteilt man die auditive Repräsentation in verschiedene Displayarten (siehe Abbildung 2-8).

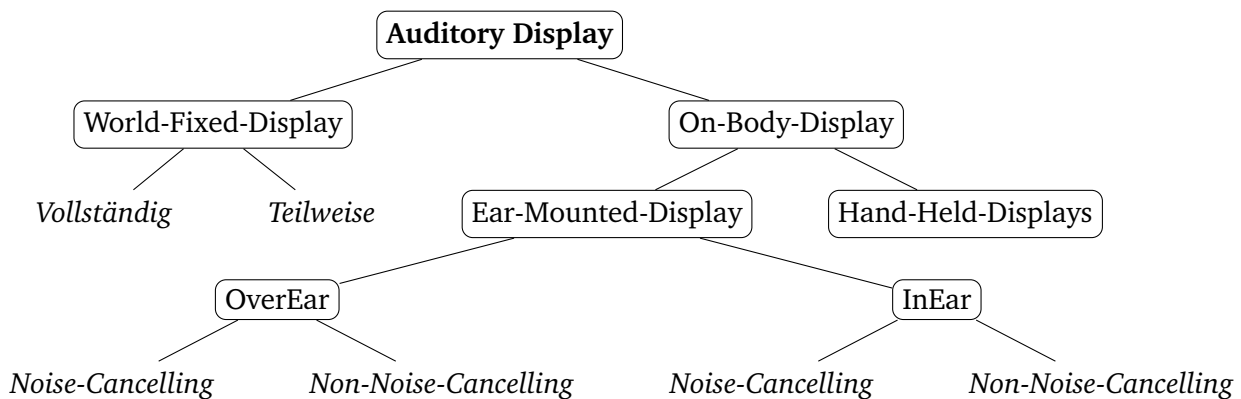


Abbildung 2-8: Technische Möglichkeiten der auditiven Displays

Dabei gibt es mit den fixen Lautsprechersystemen wie z. B. im Kino und in Monitoren die Kategorie der World-Fixed-Display (siehe Abbildung 2-9 (1)). World-Fixed-Display werden in diesem Kontext auch selten als Sound Stage benannt [275]. Diese können bei einer beschränkten Ausführungsart z. B. als Stereo-Verbund mit zwei Lautsprechern teilweise oder wie dem vorher beschriebenen Surround-System vollständig sein. Ein entscheidender Vorteil ist, dass mit einem System eine große Anzahl an Nutzenden versorgt ist. Negativ ist, wie auch Craig et al. [67] feststellen, das World-Fixed-Displays für eine fixe Position des Nutzenden ausgelegt sind und somit bei der Bewegung des Nutzenden an Ort und Stelle bleiben. Die klangliche Orientierung wird verschoben und es entstehen Fehler bei der auditiven Ausrich-

tung des Nutzenden. Beispielsweise ist bei einer 180°-Drehung des Anwendenden, der aus den vorne platzierten Lautsprechern kommende Ton nicht mehr als „von vorne“ wahrnehmbar.

Anders ist dies bei Lautsprechersystemen der Kategorie On-Body-Display, welche am oder durch den Körper mitgeführt werden. Gängig sind hier die Ear-Mounted-Displays, welche als Kopfhörer bekannt sind. Zum einen gibt es die sogenannten OverEar-Kopfhörer, welche auf das Ohr aufgetragen werden und dieses teilweise oder vollständig umschließt (siehe Abbildung 2-9 (2)). Zum anderen existieren die InEar-Kopfhörer, bei denen der Lautsprecher in den Gehörgang eingeführt wird und somit innerhalb des Körpers liegen (siehe Abbildung 2-9 (3)). Beide Ausführungen können eine spezielle Technologie das sogenannte Noise-Cancelling (dt. Geräuschunterdrückung) umsetzen. Dabei wird entweder durch vollständig Geräuschabschirmung mittels Dämmung oder durch die Analyse der Umgebungsgeräusche ein Gegenschall erzeugt, welches die Umgebungsgeräusche vollständig oder teilweise absorbiert und somit unterdrücken soll. Ziel ist es das Sounderlebnis im Gegensatz zu Hardwarekomponenten der World-Fixed-Display ohne Störungen von fremden Geräuschen genießen zu können. Die letzte Variante der On-Body-Display sind Hand-Held-Display, welche sich vereinfacht in Smartphones aber auch vermehrt in Hand-Controllern befinden, um lokal Töne und Sound in der Hand des Nutzenden emittieren zu können. Dies ist dann der Fall, wenn durch Interaktion mit dem Hand-Controller und einem virtuellen Gegenstand in der Hand ein Ton entstehen soll (z. B. Pistolenschuss, Öffnen einer Flasche u.ä.).

Im Vergleich der verschiedenen Displayarten bieten die Ear-Mounted-Display-Systeme die größte und gleichzeitig maximale Bewegungsfreiheit des Nutzenden. Der Hörsinn ist somit der Sinn, welcher durch die künstliche Repräsentation am besten und umfänglichsten bespielt und gereizt werden kann (siehe Tabelle A-2).

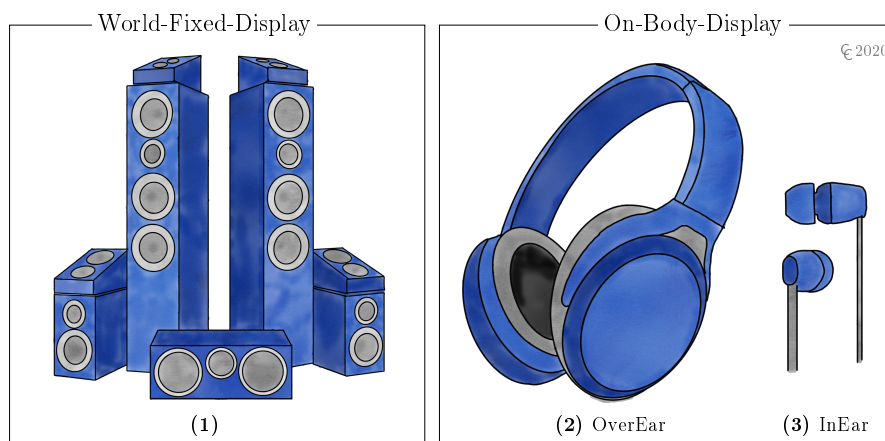


Abbildung 2-9: Beispiele zur Hardwarelösung der auditiven Displays
(Eigene Darstellung in Anlehnung an [24], [35], [82])

iii) Bekannte Auswirkungen und Kombinationseffekte

Dadurch, dass die räumliche Verortung von Schallquellen über das Gehör mittels der Lautstärke und das unterschiedliche Eintreffen auf die verschiedenen Seiten bzw. Ohren stattfindet, kann dies virtuell über die Soundeigenschaften bewusst verdreht werden. Sherman und Craig [275] beschreiben wie mittels dieser Technik virtuelle Objekte bewegt und als solche wahrgenommen werden, ohne dass die Bewe-

gung tatsächlich geschieht. Es kann also durch unterschiedliche Tonspuren oder das gezielte Bespielen der Ohren Richtung, Geschwindigkeit und räumliche Orientierung beeinflusst und manipuliert werden. Storms [293], Mastoropoulou und Chalmers [198] gehen noch weiter. Beide Forschergruppen untersuchten die Auswirkungen und Synergieeffekte der auditiven auf die visuelle Wahrnehmung. Mastoropoulou und Chalmers [198] zeigen dabei die Möglichkeit auf, wie mittels eingespielter langsamer Musik die visuelle Repräsentation mit geringerer Framerate also Bildfrequenz angezeigt werden kann. Es sind also weniger Bilder pro Sekunde nötig, um die gleiche visuelle Wahrnehmung zu verursachen, wenn langsame Musik gespielt wird, als ohne Musik. Dieser Effekt konnte für schnelle Musik nicht festgestellt werden. Mit dieser Möglichkeit könnten gegebenenfalls die Rechenleistung von gerenderten Bildern reduziert werden, da sich schlicht deren Anzahl verringert. Ähnlich hat Storms [293] die Qualität von Audio und Bild und die Akzeptanz der anwendenden Person analysiert. So konnte festgestellt werden, dass die Kopplung von mittleren oder hochqualitativen auditiven Displays mit hochqualitativen visuellen Displays die wahrgenommene Qualität des visuellen Displays steigert. Es ist demnach möglich die graphische Qualität durch die Beeinflussung der auditiven Wahrnehmung zu erhöhen. Gleichzeitig konnte Storms [293] herausfinden, dass eine geringe Qualität des auditiven Displays kombiniert mit einem hochqualitativen visuellen Display die wahrgenommene Qualität des auditiven Displays steigert und die Akzeptanz insgesamt größer ist als ohne eine auditive Repräsentation in der virtuellen Umgebung. Wie wichtig die Nutzung von auditiven Displays und das Bespielen der auditiven Wahrnehmung ist, zeigt Kortum [164], indem nachgewiesen wird, dass Erlebnisse, Gelerntes und Gehörtes länger im Gedächtnis und somit als Erinnerung verweilen als rein visuelle Erlebnisse. Es lässt sich insgesamt festhalten, dass die Qualität des Realitätsgefühls in einer virtuellen Umgebung eine Funktion der auditiven und visuellen Wahrnehmung und deren Kombination miteinander ist.

2.1.4 Haptische Wahrnehmung

Der haptischen Wahrnehmung steht im menschlichen Körper das größte Sinnesorgan zur Verfügung. Die Haut dient als Rezeptor zur Aufnahme von haptischen Reizen. Es gibt zwar Unterschiede von Reizempfindlichkeiten, wodurch Reize über die Fußsohlen, Handflächen nicht so klar bis gar nicht wahrgenommen werden, wie über die Fingerspitzen, Lippen oder Zunge. Die Haut als mechanischer Rezeptor nimmt Druck, Berührung, Vibration und Schwingungen wahr [164]. Diese Reizungen können sehr fein wie z. B. ein Windhauch, eine feine Oberfläche oder durch große Druckeinwirkung wie z. B. durch abruptes Auftreffen auf einen fixen Gegenstand grob und heftig sein. Neben dieser mechanischen Reizung kann die Haut thermodynamische Wechselwirkungen feststellen und somit dem Körper ein Gefühl von Kälte bzw. Wärme vermitteln.

Eine Besonderheit der haptischen Wahrnehmung ist ihre Bidirektionalität [275]. So folgt bei jeder Interaktion des Menschen beim z. B. Greifen eine Reaktion durch das Fühlen des jeweiligen Objekts. Laut Jerald [151], Sherman und Craig [275] wird die Bidirektionalität in aktiver und passiver Form beschrieben. Bei einer passiven Aktion wird von der Umgebung eine Interaktion ausgeführt, die haptisch wahrgenommen werden kann z. B. Wind auf der Haut. Die aktive Form beschreibt den Vorgang, wenn der Mensch bewusst mit dem Tastsinn etwas erspürt oder eine Interaktion vollzieht, welche eine haptische Reizung verursacht. Dies macht die Haptik sehr komplex.

i) Technische Herausforderungen

Wie bereits beschrieben ist die Haptik bidirektional und abhängig ob diese aktiv durch den Menschen oder passiv durch die natürliche Umgebung ausgeführt wird [151], [275]. Es ist folglich ein Unterschied ob ein Gegenstand auf den Menschen oder ein Mensch auf den Gegenstand trifft. Die Bidirektionalität verursacht ein Gefühl von Widerstand entstehend durch Krafteinwirkung wie beispielsweise Gewicht von Objekten. Diese Kraft ist tatsächlich vorhanden und wird über die Haut als Reiz verarbeitet. Durch diese Krafteinwirkung wird ebenfalls die Oberflächenstruktur und Textur des jeweiligen Objekts deutlich und wahrgenommen. Dabei kann die Haut auf feine Unterschiede bis hin zu einem Millimeter reagieren und detektieren [275]. Neben dieser abzubildenden Schwierigkeit ist die Größe und damit präzise Lokalisation von haptischen Reizen durch die Haut eine große Herausforderung. Der Mensch kann die haptische Reizung auf seinen Körper orten und noch dazu charakterisieren. Die Charakterisierung kann speziell durch die Einwirkungen der Temperatur, Textur und des auswirkenden Widerstandes bzw. des Gewichts erfolgen. Je nach Oberflächenbeschaffenheit des Objekts und der Wärme, die dieser ausstrahlt, wird das subjektive Gedächtnis angeregt und anhand vom Erlernten einsortiert und bestimmt. Die Schwierigkeit dieses Sinnes und der entsprechenden Reizung liegen also in den zahlreichen Facetten und gleichzeitig in der Größe des Organs.

ii) Hardwarelösungen

Es gibt zahlreiche Hardwarelösungen, um die verschiedenen Formen der Haptik und Interaktion zu ermöglichen (siehe Tabelle A-4 & Tabelle A-5). Eingeteilt werden können diese Hardwarekomponenten in die drei Kategorien der World-Fixed-Display, On-Body-Display und der Natural-Real-Display (siehe Abbildung 2-10).

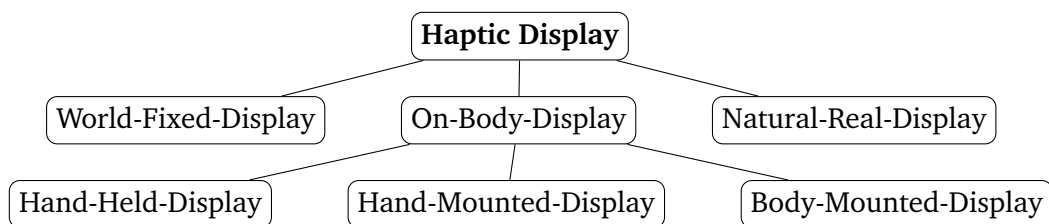


Abbildung 2-10: Technische Möglichkeiten der haptischen Displays

Jede dieser Kategorien besitzt aktive und passive Bestandteile oder eine Kombination aus beiden. World-Fixed-Display können beispielsweise Eingabegeräte wie fixierte Bewegungsplattformen z. B. Fahrsimulator, Fußpedale mit Steuerrad oder auch statische Displays mit Touch-Oberfläche sein [275]. Man nennt die Displays der World-Fixed-Displays auch World-Grounded oder Self-Grounded [151], aber sie beschreiben immer den Zustand, dass diese Komponenten einen geringen Freiheitsgrad und somit wenig Raum für Translationen und Rotationen besitzen. Die soeben beschriebenen Beispiele sind Ausprägungen der aktiven World-Fixed-Displays, da diese vom Anwendenden aktiv geführt, benutzt und mit ihnen interagiert wird. Eine andere Form der aktiven World-Fixed-Display sind softwaregesteuerte oder mechanisch reagierende Hardwarekomponenten. Diese werden selbstständig meist als Reaktion auf ein Verhalten des Nutzenden gesteuert, um so eine Bewegung oder Kraft auf den Anwendenden auszuüben. Beispiele

sind hierfür Roboterarme, welche virtuell zur Simulation bestimmter Gegenstände genutzt werden (siehe Abbildung 2-11 (1)). Der große Vorteil dieser Roboterarme ist neben der Kraftübertragung auch die Nutzung von unterschiedlichen Formen und Oberflächenstrukturen, die real empfunden werden können. Passive Hardwarekomponenten können beispielsweise Ventilatoren zur Luftzufuhr, Heizstrahler oder Luftkissen sein (siehe Abbildung 2-11 (2)). Diese simulieren meist die virtuelle Umgebung und die nutzende Person kann diese nicht aktiv beeinflussen, nimmt die Umgebung aber als vorhanden in ihrer Form und Ausprägung wahr.

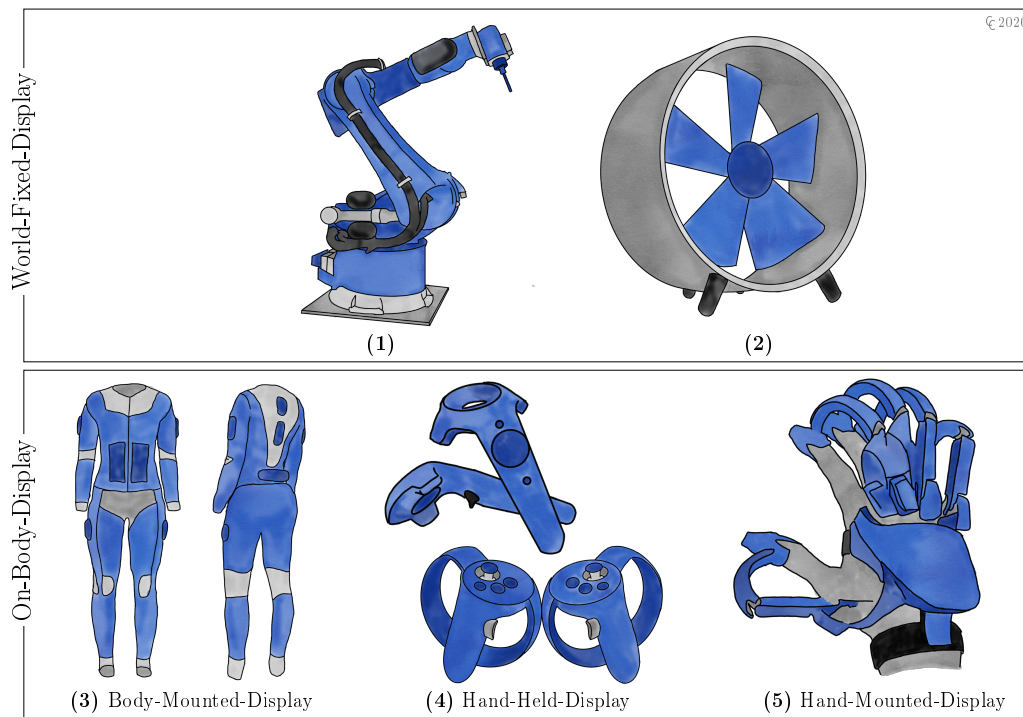


Abbildung 2-11: Beispiele zur Hardwarelösung der haptischen Displays
(Eigene Darstellung in Anlehnung an [64], [102], [168], [238], [302])

Neben den World-Fixed-Display gibt es die On-Body-Display, welche wiederum in die Hand-Held-Display, Hand-Mounted-Display und in die Body-Mounted-Display eingeteilt werden können. Bekannt sind in erster Linie Geräte aus dem Bereich der Hand-Held-Displays, wie beispielsweise Hand-Controller [275], Joysticks, Smartphones, oder der 1963 entwickelte Sketchpad [296] (siehe Abbildung 2-11 (4)). Diese können in der Hand gehalten werden und geben haptische Impulse durch zumeist Vibration. Die Entwicklungen der Hand-Controller zeigen, dass diese in Form und Design an die Anatomie des Menschen angepasst werden. Dies dient dazu, um mit ihrem geringen Gewicht kaum merklich mitgeführt werden zu können. Die vollständige Verschmelzung findet aber meist dann statt, wenn die anwendende Person das Gerät nicht mehr aktiv halten muss, sondern dies fest an der Hand fixiert ist. Der Übergang wird immer fließender, dennoch gibt es die Kategorie der Hand-Mounted-Displays (siehe Abbildung 2-11 (5)). Dies sind Handschuhe wie sie in Tabelle A-4 zahlreicher Hersteller aufgezählt sind (siehe z. B. [70], [171], [193], [219], [238], [271], [272], [301], [316], [336]). Ähnlich wie die Roboterarme der World-Fixed-Display können Geräte der Hand-Mounted-Displays Kräfte auf den Nutzenden ausüben. Dies wird meist als Force-Feedback (dt. Kraftrückmeldung) oder Force-Display bzw. Taktile-Display be-

zeichnet [275]. Dabei kann die Kraftauswirkung aus einer reinen Vibration bestehen oder taktil mit echter Kraftzufuhr [151]. Da eine gezielte Force-Feedback-Aktion mechanische Teile benötigt sind Geräte dieses Typs meist sehr groß, schwer und schränken die Bewegungsfreiheit und somit die Freiheitsgrade ein.

Die meisten Eingabegeräte und Repräsentanten der haptischen Hardware beschränken sich auf die Hände. In der Kategorie der Body-Mounted-Display liegt der Fokus stattdessen auf mehreren Körperregionen maximal sogar der ganze Körper. Hier wird die Größe des Sinnesorgans und die Fähigkeit Reize zu orten genutzt, um gezielte haptische Reize zu setzen. Meist als Anzüge oder Bänder entwickelt, werden diese Displays angezogen oder um das jeweilige Körperteil geschnallt und kann softwareseitig einzeln angesteuert werden (siehe Abbildung 2-11 (3)). In diesem Bereich sind die Entwicklungen zahlreich, aber es sind nur wenige Produkte daraus entsprungen. Die Produkte z. B. [27] sind meist teuer und beschränken sich auf unterschiedlich viele Vibrationseinheiten, welche als grobes Force-Feedback genutzt wird. Es gibt allerdings bereits Prototypen, welche neben dem Force-Feedback auch Wärme simulieren können z. B. [302]. Am Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen (IIB) wurde ebenfalls eine prototypische Heizweste zur Simulation von Wärme entwickelt und beim virtuellen Training mit Feuerlöschern¹ angewendet. Eine vollständige und ausführliche Liste zu allen Geräten und ihrer Kategorie findet sich im Anhang in Tabelle A-4 und Tabelle A-5.

Die letzte Form der haptischen Displays sind die Natural-Real-Displays. Diese entsprechen Objekten der natürlichen Realität welche als solche in der virtuellen Umgebung teilweise oder vollständig genutzt werden. Der Vorteil daran ist, dass die Repräsentation der natürlichen Realität entspricht und Gegenstände die wahre Oberflächenstruktur, Gewicht und Verhalten besitzen. Natural-Real-Displays sind somit die einzigen, welche eine geeignete Form der Oberflächenstruktur aufweisen. Allerdings kann es unter Umständen schwierig sein, diese vollständig und das Verhalten detailliert in der Simulation und somit in der virtuellen Umgebung aufzunehmen. Außerdem kann ein Objekt für genau eines genutzt werden und es sind somit unter Umständen viele Gegenstände nötig. Aber durch die Entwicklung von z. B. HTC und ihren Trackern ist es nun nahezu möglich jedes Gerät in der virtuellen Umgebung zu verorten [64]. Diese Objekte können aktiv und passiv sein. In ihrem passiven Zustand sind sie gleichsam der natürlichen Realität. In ihrer aktiven Variante werden diese mit weiteren Sensoren versetzt, um zusätzlich über die natürliche Repräsentation hinaus, Informationen an die Simulation zu liefern oder Funktionalitäten wie Vibration umzusetzen.

Im Bereich der haptischen Displays gibt es die größten Unterschiede. Die Entwicklungen zeigen, dass sich die einzelnen Kategorien teilweise vermischen oder zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Simulation verschieden genutzt werden. Allerdings ist das Ziel aller Bestrebungen die natürliche Realität weitgehend nachzuempfinden, das Feedback natürlich und die Handhabbarkeit unauffällig zu gestalten.

iii) Bekannte Auswirkungen und Kombinationseffekte

Es sind wenig Untersuchungen die Auswirkungen, Synergien und Kombinationseffekte von Haptik auf andere Sinne zum Fokus haben bekannt. Es gibt klare Nachweise, dass die Haptik für die gustatorische Wahrnehmung eine Rolle spielt wie ebenfalls das Gefühl des eingenommenen Lebensmittels für

¹ YouTube-Video: <https://www.youtube.com/watch?v=48FhzEiZbuA> Aufgerufen am 14.04.2020.

den Geschmack entscheidend ist [56]. Daneben ist auch bekannt, dass die haptische Wahrnehmung der visuellen untergeordnet ist und somit Diskrepanzen zwischen Fühlen und Sehen zu Gunsten des Visualisierten entschieden werden [48], [275]. Untersuchungen, ob mit einem gesteigerten Erlebnis der Haptik andere Sinne vernachlässigt oder weniger gewichtet werden, sind nicht bekannt.

2.1.5 Olfaktorische Wahrnehmung

Die olfaktorische Wahrnehmung ist die am wenigsten erforschte Wahrnehmungsform. Es sind nur wenig definierte Fakten und nur ein paar Untersuchungen bekannt, um aussagekräftige Vorhersagen über Kombination und Effekte zu treffen. Fest steht, dass der Mensch seinen Geruchssinn in der Nase hat. Gerüche sind chemische Verbindungen oder einzelne Moleküle. Dabei konnte bisher festgestellt werden, dass nur Verbindungen von Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Sauerstoff (O), Stickstoff (N), Phosphor (P), Schwefel (S), Chlor (Cl), Brom (Br) und Jod (I) für den Menschen wahrnehmbare Gerüche erzeugen. Dabei müssen die einzelnen Stoffe eine molekulare Verbindung mit weiteren Elementen eingehen. Ausnahmen sind die drei Halogene Cl, Br und I, welche auch als reines Molekül einen Duft verströmen [164]. Ebenfalls ist bekannt, dass geruchsverbreitende Molekül meist ein mittleres Molekulargewicht von etwa 30 bis 300 g/mol besitzen [164]. Schwerere oder leichtere Moleküle sondern keinen Duft aus. Was den tatsächlichen Duft auslöst, den ein jeder wahrnimmt, ist nicht bekannt. Bei künstlichen Düften werden meist durch zahlreiche Tests Molekülverbindungen ermittelt, welche eine ähnliche Interpretation liefern. Diese Anzahl der Elemente und die noch größere Kombinationsvielfalt an Molekülen schafft eine große Geruchslandschaft. Schätzungsweise können die Menschen somit circa 400.000 Gerüche wahrnehmen und davon Tausende - in einigen Fällen auch Zehntausende - Gerüche unterscheiden [164]. Auch wenn die Wissenschaft stetig darüber streitet wie viele Gerüche der Mensch unterscheiden kann, hat man sich aktuell darauf geeinigt, dass es zwischen 20-30 wesentliche Düfte, sogenannte Basis-Düfte, gibt [164].

i) Technische Herausforderungen

Da von Geruch wenig bekannt und die genaue Funktionsweise nicht verstanden ist, gibt es einige technische Herausforderungen. Grundsätzlich ist die olfaktorische Wahrnehmung abhängig des eingenommen Duftstoffes und seiner Eigenschaften. Der Duftstoff als chemische Molekülverbindungen kann nur bei ausreichender Konzentration wahrgenommen werden. Dabei darf die Konzentration auch die für den Stoff spezifische Maximalkonzentration nicht überschreiten, da sonst ebenfalls kein Duft registriert werden kann. Es kommt somit auf die Dichte und Verteilung des Duftstoffes an. Ähnlich der Schallausbreitung (siehe Kapitel 2.1.3) treten bei der Mischung und Verbreitung von Duftstoffen Interferenzen auf. Hierbei kann es zur Mischung und Neubildung von Düften kommen oder aber die Dominanz eines der Düfte überwiegt alle anderen. Es kann keine Vorhersage getroffen werden, welche Düfte andere überreffen. Allerdings gibt es Düfte, die als besonders beißend und damit überlagernd bekannt sind wie beispielsweise Schwefel. Das Nichtwissen in diesem Bereich ist eine große Herausforderung und kann nur durch Test und Feldversuche gelöst werden.

Eine der größten Herausforderungen für die künstliche Beseitigung der olfaktorischen Wahrnehmung ist die Beseitigung von Düften. In der visuellen Wahrnehmung ist es möglich das Signal sprich das Bild zu entfernen und somit den Reiz auszuschalten (siehe Kapitel 2.1.2). Ähnlich geht dies bei Schallquellen

oder haptischen Signalen. Bei Düften ist dies nur durch ein aktives Zuführen von Neutralisationsdüften möglich. Diese sind leider nicht einheitlich und müssen auf den jeweilig zu reduzierendem Duft ausgelegt werden. Es findet eine chemische Reaktion statt, die eine Neutralisation verursacht. Es gibt kaum Neutralisationsdüfte, Produkte, die dies Versprechen, sind meist Überlagerungsdüfte, welche selbst meist einen Zitrushaltigen Duft verströmen. Es wird demnach nicht der Duft neutralisiert, sondern durch einen anderen ersetzt. Eine technische Umsetzung von schnellen und vollständigen Duftwechseln ist daher aktuell kaum möglich.

ii) Hardwarelösungen

Trotz der Herausforderungen und dem mangelnden Wissen von Duftstoffen gibt es einige künstliche Lösungen zur Bespielung der olfaktorischen Wahrnehmung. Es gibt seit Jahrhunderten ätherische Öle und andere Duft-produzierende Stoffe, welche verbrannt oder verteilt werden, um Gerüche an bestimmten Orten zu erzeugen. Innerhalb der Recherche wurden einige spezifische Hardwarekomponenten zur gezielten Verbreitung von Duftstoffen gefunden (siehe Tabelle A-6). Diese können, wie in Abbildung 2-12 dargestellt ist, erneut in World-Fixed-Display und On-Body-Display eingeteilt werden. Am verbreitetsten sind die World-Fixed-Display, welche über Erhitzen von Stoffen wie z. B. ätherische Öle oder das Versprühen von künstlichen Stoffen Düfte im Raum verteilen. Diese können gekoppelt mit einem Ventilator auch in eine bestimmte Richtung geführt werden. Meist ist der große Nachteil, dass Duftstoffe nicht gezielt beim Anwendenden ankommen und somit nicht mehrere Nutzende gleichzeitig andere Düfte wahrnehmen können. Einen Lösungsansatz liefern Seah et al. [264], die mittels eingesperrter Düfte in speziellen Rauchblasen den Nutzenden aktiv mit dem gewünschten Duft beschießen (siehe Abbildung 2-13 (1)). Durch den gezielten Beschuss findet sich der Duft nur beim jeweilig getroffenen Ziel wieder. Ein anderer Ansatz ist die Verwendung von elektrischen Impulsen als Duftimitatoren anstatt von chemischen Verbindungen. Cheok und Karunanayaka [56] beschreiben wie über elektrische Signale direkt in die Nase Geruchsempfindungen ausgelöst werden können. Allerdings ist die genaue Steuerung und Zuordnung von Signal zu speziellem Duft noch eine große Forschungsfrage.

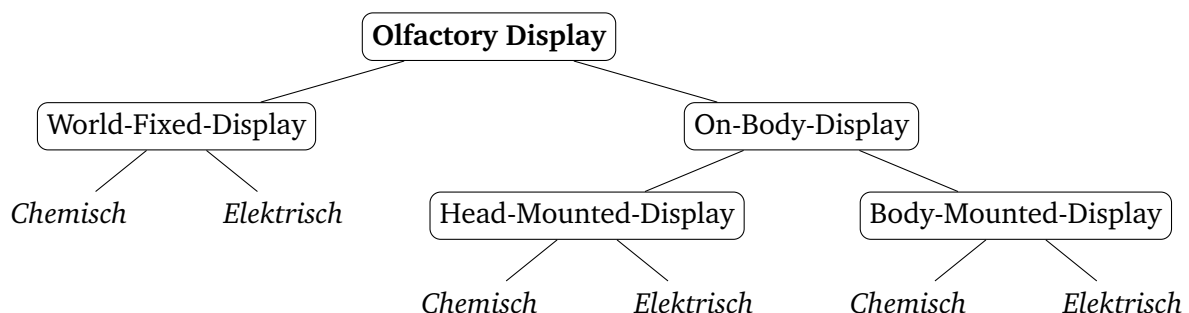


Abbildung 2-12: Technische Möglichkeiten der olfaktorischen Displays

Ein anderer Lösungsansatz ist die Nutzung von On-Body-Display bzw. Body-Mounted-Display für die olfaktorische Bespielung. Hier wird ein meist kleines Gerät am Körper mitgeführt oder als Kette getragen (siehe Abbildung 2-13 (2)). Dieses Gerät verströmt entweder chemische Duftstoffe oder sendet elektrische Impulse in die Nase, um den Geruch zu stimulieren. Die Freiheitsgrade sind hier maximal, somit

gibt es keine Bewegungseinschränkungen. Allerdings ist die Anzahl der Düfte pro Anwendung meist aufgrund des Gewichts bzw. Größe des Geräts auf wenige beschränkt. Neben den Ketten-ähnlichen Geräten gibt es auch Produkte, welche direkt an der Nase getragen werden. Diese Head-Mounted-Displays, wie beispielsweise [109], [310], senden ebenfalls chemische Düfte direkt an den Nutzenden und regen somit die olfaktorische Wahrnehmung an. Ähnlich wie die Body-Mounted-Displays unterliegen die Head-Mounted-Displays aufgrund von Gewicht und Größe z. B. von Kartuschen in der Anzahl an unterschiedlichen Düften. Eine elektrische Stimulation bei den On-Body-Display wurde noch nicht gefunden, ist aber aufgrund der Ergebnisse von Cheok und Karunanayaka [56] denkbar und ein möglicher Lösungsansatz, um die Anzahl der verschiedenen Düfte zu simulieren.

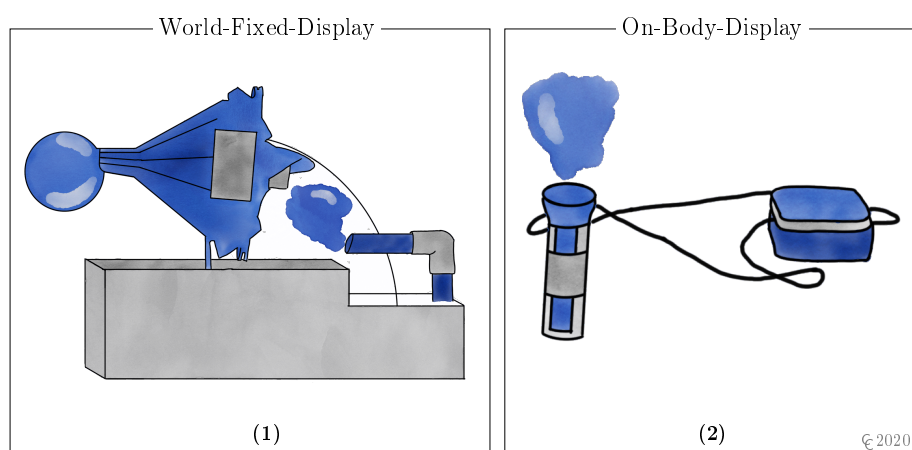


Abbildung 2-13: Beispiele zur Hardwarelösung der olfaktorischen Displays
(Eigene Darstellung in Anlehnung an [8], [264])

iii) Bekannte Auswirkungen und Kombinationseffekte

Interessant ist, dass es wenig Forschung über die Düfte an sich gibt, dafür aber über die Auswirkungen, die sie auf den Menschen haben. Amores et al. [9] haben festgestellt, dass der Geruch einen steigernden Effekt auf das Empfinden von Erholung und Schmerz verursacht. Durch Duftstoffe können Nutzende leichter in einen erholsamen oder schmerzhaften Zustand versetzt und somit das Potential der Anwendung gesteigert werden. Dinh et al. [78] untersuchten den Effekt auf das Gefühl von Präsenz (siehe Kapitel 2.3) durch zusätzliche Darstellung von Gerüchen in der virtuellen Umgebung. Dabei wurde festgestellt, dass das Gefühl von Präsenz steigt. Diese Aussage unterstützen Munyan et al. [212] und Chen [54]. Dabei betonen Dinh et al. [78], dass die Nutzung der olfaktorischen Wahrnehmung das Präsenzgefühl mehr steigern als die Verbesserung der visuellen Wahrnehmung durch bessere graphische Details. Deshalb schlussfolgern sie, dass Präsenz ohne den Einsatz der olfaktorischen Wahrnehmung niemals vollständig sein kann.

Egan et al. [86] erläutern, dass beim Einsatz von Duftstoffen die allgemeine Stimulation nachweislich gesteigert wird, aber die genaue Auswirkung auf das Gefühl der Immersion nicht klar detektiert werden kann. Es ist klar ersichtlich, dass Ungenauigkeiten einzelner Wahrnehmungskomponenten weniger auffallen, umso mehr Sinne beansprucht werden. Dies unterstützt die Aussage der selektiven Wahrnehmung, der der Mensch unterliegt. Es können also durch den Einsatz mehrere Sinne unter anderem dem

Geruchssinn Detailschwächen oder nicht eindeutig abbildbare Reize kompensiert werden.

Neben dem positiven Effekt auf die Präsenz und andere Sinne, steigert Geruch das Erinnerungsvermögen. Wie in Kapitel 2.1.3 beschrieben, können nachweislich auditiv aufgenommene Signale länger in Erinnerung verweilen als visuelle. Reize und deren Verarbeitung über die olfaktorische Wahrnehmung steigern die Verweildauer und die Möglichkeit die Erinnerung abzurufen nochmals [164]. Die positiven Auswirkungen der olfaktorischen Wahrnehmung sind ausreichend, dass eine weitere und zielgerichtete Forschung und Anbindung erstrebenswert sind.

2.1.6 Gustatorische Wahrnehmung

Die gustatorische Wahrnehmung steht in ihrer Komplexität dem Geruchssinn in nichts nach. Es sind zwar mehr Fakten über den Geschmackssinn bekannt. Allerdings ist es dadurch, dass dieser Sinn nicht als einzelner Sinn, sondern aus der Kombination seiner selbst, der olfaktorischen, auditiven und haptischen Wahrnehmung zu betrachten ist, sehr komplex [56], [151], [164]. Immer wieder gibt es Untersuchungen, die nahelegen, dass die visuelle Wahrnehmung eine Rolle spielt und somit die gustatorische Wahrnehmung einem Kombinationssinn aus allen vorhandenen Sinnen entspricht [164]. Der Mensch kann über 10.000 verschiedene Geschmacksrichtungen schmecken und unterscheiden. Dabei sind für jeden Geschmack zwischen 50 bis 150 Rezeptoren auf der Zunge dafür verantwortlich den Reiz vom Mund ins Gehirn zu übertragen [275]. Die Grundstoffe für jeden individuellen und facettenreichen Geschmack sind in ihrer Anzahl allerdings überschaubar. Ging man früher von den vier Geschmacksstoffen süß, salzig, bitter & sauer aus, sind es heute bereits sechs verschiedene (süß, salzig, bitter, sauer, würzig / pikant [$\hat{=}$ umami], fettig) [56]. Diese Geschmacksstoffe werden durch Lebensmittel in unterschiedlicher Intensität und Zusammensetzung angeregt und verursachen somit den individuellen Geschmack. Gleichzeitig werden über das Gefühl im Mundraum und dem Schall, der beim Beißen entsteht, vom Gehirn analysiert und für die subjektive Interpretation genutzt.

i) Technische Herausforderungen

Die gustatorische Wahrnehmung bringt aufgrund der Kombination mit den anderen Sinneswahrnehmungen große technische Herausforderungen mit sich. Es gilt demnach bei der Bespielung der gustatorischen Wahrnehmung nicht nur die grundsätzliche Schwierigkeit der künstlichen Geschmacksstoffe, sondern auch die anderen Sinne zu reizen. Somit sind Herausforderungen, die in den Kapiteln 2.1.2, 2.1.3, 2.1.4 und 2.1.5 beschrieben sind, auch hier von Belang.

ii) Hardwarelösungen

Trotz der zahlreichen Herausforderungen gibt es einige Forschungsansätze, die versuchen die gustatorische Wahrnehmung künstlich über World-Fixed-Display und On-Body-Display zu reizen (siehe Abbildung 2-14 & Tabelle A-7). Wie bei der olfaktorischen Wahrnehmung kann die gustatorische Wahrnehmung mittels chemischer und elektrischer Verfahren gereizt werden. Chemisch können die Grundgeschmäcker über verschiedene Stoffe angeregt werden. Süße wird beispielsweise mit Saccharose, bitter mit Weinsäure, salzig mit Kochsalz, sauer mit Sulfaten und würzig mit Natriumglutamat gereizt [164]. Im Gegensatz

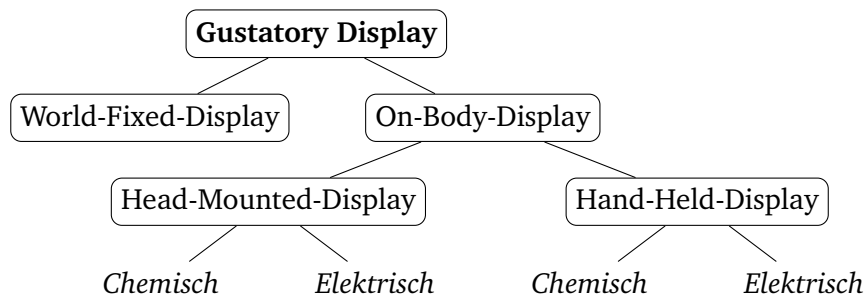


Abbildung 2-14: Technische Möglichkeiten der gustatorischen Displays

dazu, kann mittels elektronischer Stimulation bisher nur der Geschmack von würzig, bitter und süß erzeugt werden. Süß ist dabei am einfachsten zu detektieren [56].

Unabhängig davon, ob die gustatorische Wahrnehmung über die elektronische oder chemische Stimulation erfolgt, konnte man feststellen, dass die Temperatur die Geschmacksintensität und somit das Empfinden von Geschmack verstärkt [56], [151]. Dabei wird die reine Temperaturveränderung meist als süß empfunden. Die bisherigen Lösungsansätze für die, wie sie Maynes-Aminzade [200] nennt, Edible Userinterfaces (dt. essbare Nutzerschnittstellen) bauen vorwiegend auf der Stimulation der Zunge über eine Elektrode auf. Nakamura und Miyashita [215] erzeugen bei ihrem digitalen Cocktail als Hand-Held-Display über Temperatur und elektronischer Reizung ein Geschmacksempfinden (siehe Abbildung 2-15 (2)). In einer späteren Variante wird zusätzlich über eine variierende Farbkomponente der Geschmack untermalt. Mit dem TasteScreen als Lösung der World-Fixed-Display kann die nutzende Person durch Ablecken des Bildschirms chemische Stoffe aufnehmen [56].

All diese Ansätze verfolgen den reinen Geschmack als Reiz für die gustatorische Wahrnehmung. Lediglich Narumi et al. [217] stellen einen Ansatz für Haptik, Geruch und damit Geschmack vor. Mit ihrem MetaCookie+ schaffen sie mit Hilfe von AR, einen echten geschmacklosen Keks und Duftstoffen gute Resultate (siehe Abbildung 2-15 (1)). Es wird ein realer Keks gegessen, welcher mittels AR für den Nutzenden auf einem visuellen Head-Mounted-Display als z. B. Schokoladenkeks erscheint. Beim Einführen in den Mund wird gleichzeitig der passende Duftstoffe über das Head-Mounted-Display ausgesendet, wodurch beim Anwendenden ein Geschmack für den sonst neutralen Keks entsteht. Daneben wird der Keks innerhalb des Head-Mounted-Displays mit der jeweiligen virtuellen Repräsentation z. B. Schokolade visualisiert. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass Probanden die geschmacklosen Kekse eindeutig den simulierten Geschmäckern zuordnen konnten. Damit zeigen Narumi et al. [217] das mittels visueller, haptischer und olfaktorischer Wahrnehmung gustatorische Reize ausgesendet werden können.

iii) Bekannte Auswirkungen und Kombinationseffekte

Über Auswirkungen, Synergien zwischen den Sinnen oder Kombinationseffekten ist wenig bekannt. Es ist davon auszugehen, dass der Geschmack die Qualität der anderen Sinne nicht in der Weise beeinflusst, wie es die anderen Sinne untereinander tun. Festhalten kann man allerdings, dass die Erinnerung an bestimmte Geschmäcker länger in menschlichen Gehirn verweilt als Gehörtes [56].

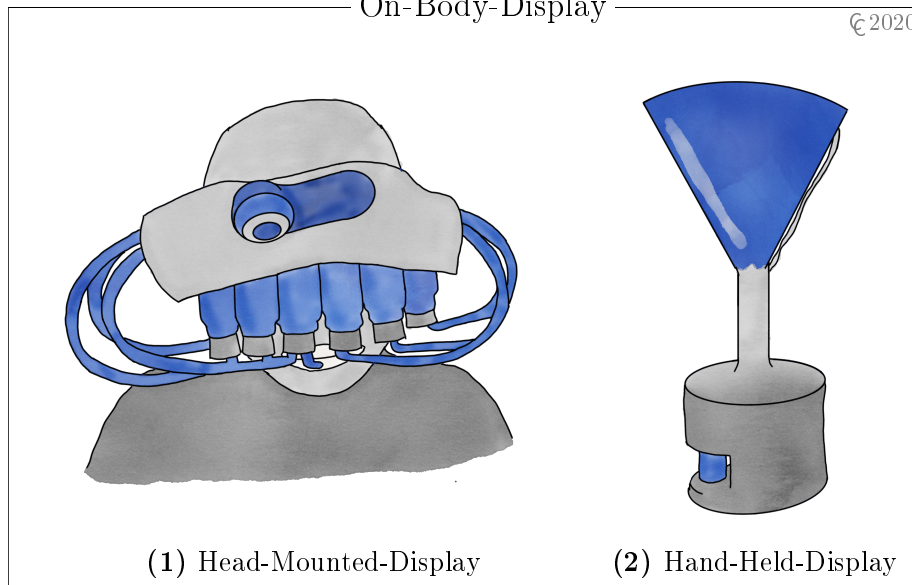


Abbildung 2-15: Beispiele zur Hardwarelösung der gustatorischen Displays
(Eigene Darstellung in Anlehnung an [58], [217])

2.1.7 Zusammenfassung der menschlichen Wahrnehmung

Zum Ende dieses Kapitels kann zusammenfassend gesagt werden, dass die menschliche Wahrnehmung eine facettenreiche und komplexe ist. Mit allen Sinnesorganen betrifft diese den vollständigen äußeren Körper. Alle Wahrnehmungsformen können technisch über sogenannte Displays gereizt werden. Diese Displays lassen sich in die Hauptgruppen der World-Fixed-Display und On-Body-Display einteilen. Für die visuelle, auditive und haptische Wahrnehmung gibt es bereits verschiedene Produkte im Bereich der World-Fixed-Displays und On-Body-Displays. Im Anwendungsfall der olfaktorischen und gustatorischen Wahrnehmung sind erste Forschungsansätze und Demonstratoren vorhanden, an ausgereiften Produkten mangelt es noch (siehe Auflistung verschiedener Hardware im Anhang A.1).

In diesem Kapitel konnten Synergieeffekte einzelner Sinneseindrücke aufgezeigt werden. Dadurch wurde festgestellt, dass die visuelle Wahrnehmung die dominanteste aller Wahrnehmungsformen ist. Dennoch können im Zusammenspiel mit anderen Reizen mittels der selektiven Wahrnehmung Ungenauigkeiten oder geringere Detailstufen in der künstlichen Bespielung dieser Sinne retuschiert und kaschiert werden. Durch eine gezielte Manipulation und Illusion mit unterschiedlichen Sinneseindrücken können also realistischer wirkende Szenarien und Anwendungen implementiert werden.

Es ist festzuhalten, dass es im Bereich der menschlichen Wahrnehmung noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf gibt und dennoch für jeden einzelnen Bereich bereits technische Lösungsansätze und Nutzungsformen existieren.

2.2 Mensch-Maschine-Schnittstellen und Interaktion

Neben den vielfältigen Sinneswahrnehmungen gibt es weitere Aspekte, die für ein angenehmes und realistisch wirkendes Erlebnis in Bezug auf Mensch und Maschine wichtig sind. Unter dem Schlagwort

Human-Computer Interaction (HCI) (dt. Mensch-Maschine Interaktion) wird die Forschung im Bereich der Mensch-Maschine-Kommunikation oder Interaktion zusammengefasst. Dabei ist es wichtig, wie der Mensch mit dem System interagieren kann, damit dieses versteht was verlangt wird, aber genauso auch anders herum. Neben der Kommunikation gibt es als spezielle Interaktionsform die Bewegung als Fortbewegung, welche durch die neue Technologie von VR nochmals in ihrem Entwicklungsfokus zugenommen hat. All diese Formen - Interaktion, Bewegung, Kommunikation und Kollaboration - und dafür existierende technische Lösungen sollen in den nächsten Abschnitten beschrieben und deren Grenzen aufgezeigt werden.

2.2.1 Möglichkeiten der Interaktion

Interaktion ist die Kombination aus Aktion und Reaktion und im Speziellen in der Computertechnologie die Eingabe einer Aufforderung und Verarbeitung dieser. Es geht also um die Human-Computer Interaction mit unterschiedlichen Eingabegeräten und der richtigen Interpretation und Durchführung der gewünschten Aufgabe. Das Ziel der Human-Computer Interaction ist es, den besten Weg zur idealen Interaktion von Mensch mit dem Computer zu finden. Dabei wird der beste Weg als der beschrieben, der die Höchste Intuition und Natürlichkeit für die nutzende Person - sprich Menschen - darstellt [164], [275]. Den Lösungsansätzen sind nahezu keine Grenzen gesetzt und so haben sich im Laufe des Computerzeitalters zahlreiche Eingabegeräte an diese Aufgabe gemacht und werden es sicherlich noch zukünftig einige probieren. Die bekanntesten Eingabegeräte sind wohl Maus und Tastatur. Hier wird mittels kleiner Bewegung und Tastenbetätigung ein Signal an den Computer gesendet, welcher dieses interpretiert und im Fall der Tastatur als Buchstaben- bzw. Zahleneingabe übersetzt. Diese Eingabe ist eine durch den Menschen aktiv erzeugte. Dies gilt für alle Eingabegeräte wie Hand-Controller, Steuerräder, Mikrofone, Touch-Oberflächen, Joysticks, Fußpedale u.ä. [151], [275]. Sind Maus und Tastatur noch vollständig neue Hardwarekomponenten, welche extra für die Interaktion mit dem Computer entwickelt wurden, sind andere wie z. B. das Steuerrad oder der Sketchpad [296] Eingabegeräte, die sich an natürlich realen Objekten orientieren und versuchen durch gleiche Funktionsweisen die Akzeptanz beim Anwendenden zu erhöhen. Daneben existieren passive Eingabegeräte meist Sensoren oder Kameras, welche ohne das aktive Zutun des Menschen Informationen bzw. Eingaben sammeln und dem Computer senden. Dies sind zum Beispiel GPS, Inertial Measure Unit (IMU) in Smartphones und Tablets, Kameras und unter anderem die zahlreich existierenden Sensoren wie Magnetische, Distanz-, Druck-, Licht-, Biege-, Temperatur-, Luftfluss- und biologische Sensoren [151], [275]. Passive und aktive Eingabegeräte können in den verschiedensten Kombinationen und sowohl in der Umgebung der Nutzungseinheit als auch in Gegenständen wie z. B. haptischen Eingabegeräten eingebaut sein (siehe Abbildung 2-16).

Interaktionen, die im Computer durchgeführt werden, können sich in der Simulation auf die virtuelle Umgebung, Objekte und Gegenstände wie beispielsweise digitale Bauelemente des Building Information Models (BIM) oder auf andere Personen beziehen. In Bezug auf andere Personen spricht man von Kommunikation und wird im nächsten Abschnitt 2.2.2 behandelt. Die Art und Weise wie der Mensch über die Maschine mit der virtuellen Umgebung oder virtuellen Objekten, aber teilweise auch mit Personen interagieren ist, nennt sich die Interaktionsart (siehe Abbildung 2-16). Diese teilt sich in reale, virtuelle und agenten-basierte Arten auf [67], [275].

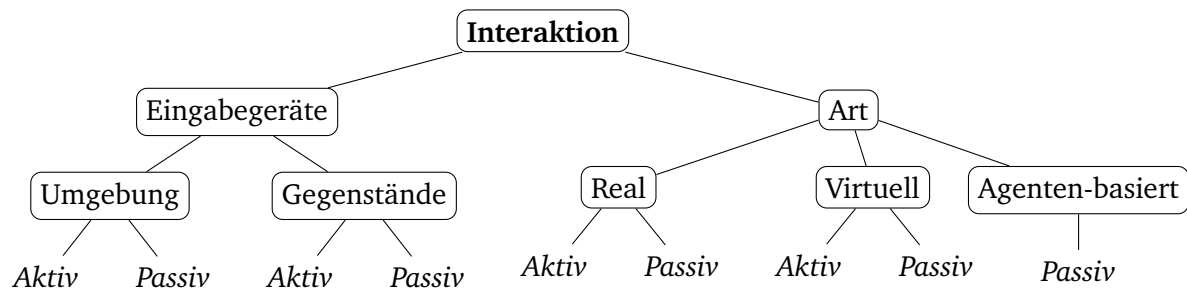


Abbildung 2-16: Umsetzungsmöglichkeiten der Interaktion

Die reale Interaktion erfolgt mit den beschriebenen Eingabegeräten, welche durch das reale Betätigen eines Knopfes oder Messen von Daten dem Computer Informationen zur Interpretation und Handlung zur Verfügung stellen. Meist sind diese Formen der Interaktion durch ihre physische Art natürlich wie beispielsweise das direkte Greifen eines Gegenstandes. Virtuelle Interaktionen basieren hier als künstliche Schnittstelle in Form von z. B. virtuellen Knöpfen u.ä. auf sogenannten GUIs. Es wird ein Zugriffspunkt in der virtuellen Umgebung sichtbar, mit dem die nutzende Person virtuell interagieren kann. In diesem Fall ist zwar eine reale Eingabe wie ein Touch- oder Mausklick-Ereignis erforderlich, dennoch wird damit nur die virtuelle Schaltfläche betätigt, welche die Interaktion des Anwendenden weitergibt oder verarbeitet [275]. Dies erhöht die Anzahl an möglichen Event-basierten und individuell gesteuerten Feldern auf nahezu unendlich, denn virtuelle Schaltflächen sind nicht begrenzt. Man kann sich vorstellen, dass man eine Tastatur mit beliebig vielen Tasten besitzen kann, bei der jede einzelne Taste eine andere Aktion verkörpert. Bei der virtuellen Eingabe kann auch ein zeit- oder positionsgesteuertes Verhalten die Eingabe vollziehen [67]. So kann bei Erreichen eines bestimmten Punktes eine Handlung im Computer verursachen. Ähnlich ist dies bei den Agenten-basierten Interaktionsarten. Agenten sind virtuelle Abbildungen von menschenähnlichen Gestalten. Diese können teilweise oder vollständig sein und müssen nicht dem Abbild eines Menschen entsprechen aber Eigenschaften bzw. Charakteristika einer natürlichen Person besitzen. Bei den Agenten-basierten Verfahren führt ein Agent durch das virtuelle Geschehen in der virtuellen Umgebung [67]. Sprich bei Erreichen eines Agenten oder durch die virtuelle Interaktion mit diesem, werden durch diese weitere Aktionen oder Reaktionen durchgeführt. Diese Form der Interaktion ist immer passiv, da die anwendende Person zwar gegeben falls mit dem Agenten nicht aber mit der durch ihn ausgeführten Aktion interagieren kann [67].

Es lässt sich festhalten, dass alle Arten der Interaktion ein einfaches Interagieren und durch Natürlichkeit eine große Akzeptanz und Verständlichkeit erzeugen wollen. Dabei werden die physischen Eingabegeräte immer mehr an die Anatomie des Menschen angepasst, um mit dem reinen natürlichen Körper in natürlicher Weise zu interagieren. In einer studentischen Abschlussarbeit am IIB wurden hierfür von Breuer [41] die Eingabegeräte für die Interaktion mit der Hand im Falle der VR untersucht. Dies waren die Hand-Controller der Oculus Rift [103] und HTC Vive [64] sowie die Kamera-basierte Lösung Leap-Motion [311]. Ziel der Untersuchung war die Akzeptanz und Natürlichkeit der Interaktion für einfache Anwendungsfälle wie Greifen, Interagieren z. B. Öffnen von Türen und Benutzen von Gegenständen zu ermitteln. Dabei stellte sich heraus, dass die Hand-Controller der Oculus Rift mit ihrer anatomischen Bauweise die größte Akzeptanz aufbauen können. Die Leap-Motion-Kamera hat aufgrund der hohen Anzahl an Erkennungsfehlern zum schlechtesten Feedback geführt. Dies ist in Anbetracht der dadurch zerstör-

ten Präsenz ein vorhersehbares und logisches Ergebnis. Als Gesamtergebnis lässt sich festhalten, dass die Akzeptanz für Human-Computer Interaction steigt, wenn die Eingabe natürlich, einfach und intuitiv erfolgt. Die Bestrebungen der Entwicklung gehen immer mehr in die Richtung Eingabegeräte, welche höhere Freiheitsgrade besitzen und den Anwendenden in der natürlichen Bewegung und Interaktion nicht bzw. nur sehr gering beeinflussen (siehe Tabelle A-4).

2.2.2 Möglichkeiten der Kollaboration und Kommunikation

Kommunikation und Kollaboration sind ebenfalls Formen der Interaktion. Da diese Interaktionstypen aber ein so großes Feld umfassen, werden diese in diesem Abschnitt separat betrachtet. Erst die Human-Computer Interaction ermöglicht Interaktion, Kommunikation und Kollaboration. Kollaboration ist die Kombination aus Interaktion und Kommunikation.

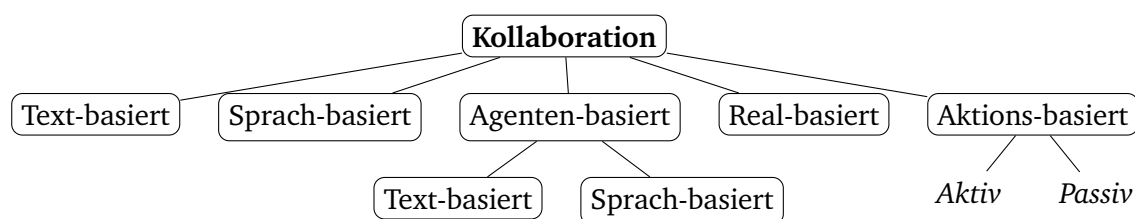


Abbildung 2-17: Umsetzungsmöglichkeiten der Kommunikation

Laut Sherman und Craig [275] kann die Kommunikation synchron und asynchron verlaufen. Somit können die Anwendenden entweder zeitgleich (z. B. Telefonie) oder zeitversetzt (z. B. Videotutorial) die Interaktion oder Kommunikationsform des jeweils anderen wahrnehmen. Die Kommunikation kann mit dem Computer als Vermittler von Mensch zu Mensch durchgeführt werden. Kommunikation beschreibt aber auch die Interaktion des Menschen mit der Maschine, wenn die Interaktion einer für die Kommunikation typischen Art entspricht. Aktuelle Entwicklungen wie Sprachassistenten sind ein Beispiel für eine solche Mensch-Maschine-Kommunikation und sollen die natürliche Interaktion mit den technischen Geräten verbessern und somit die Annahme zur Nutzung steigern.

Kollaboration ist mehr als Kommunikation, sie dient dazu Aktionen gemeinsam auszutauschen oder durchzuführen. Dabei ist Kollaboration ohne Kommunikation nicht möglich. Man spricht von einer kollaborativen Umgebung, wenn mehrere Nutzende in einer virtuellen Umgebung miteinander kommunizieren und/oder interagieren können. Dabei muss die ausgeführte Interaktion von den anderen Anwendenden wahrgenommen werden und/oder Auswirkungen verursachen [275]. Kommunikation und Kollaboration können in unterschiedliche Arten untergliedert werden. Dies sind zum einen gängige text- und sprach-basierte Verfahren wie Textchat und Telefonie, aber auch Agenten- und Aktions-basierte Verfahren (siehe Abbildung 2-17). Ähnlich der Agenten-basierten Verfahren der Interaktion wird bei der Kollaboration und Kommunikation ein Agent als künstlicher Vermittler genutzt. Eingaben des Anwendenden in text- oder sprach-basierter Art werden über den Agenten an den oder die weiteren Anwendenden weitergeleitet. Das Aktions-basierte Verfahren ist eine abstrakte Form der Kommunikation. Hier wird nicht direkt die Sprache oder das geschriebene Wort ausgetauscht, sondern die reine Aktion des Anwendenden wie beispielsweise das Markieren von virtuellen Elementen. Diese Form kann aktiv von beiden

Seiten ausgeführt und übertragen werden oder passiv sein. In der passiven Ausführung ist die Aktionsübertragung nicht bidirektional und nur eine nutzende Person oder eine Gruppe an Nutzenden kann den anderen seine bzw. ihre Aktionen übertragen. Das macht in Bezug auf unterschiedliche Rollen und Rechte Sinn [91], [92].

Text- und Sprach-basierte Verfahren sind bereits in Echtzeit auch mit einer großen Anzahl an Anwendenden möglich. Im Bereich der Agenten- und Aktions-basierten Kommunikation und Kollaboration gibt es spezifisch gute Lösungen. Die Bestrebung auch eine Real-basierte Kommunikation und Kollaboration umzusetzen hat mit der Technologie von VR nochmals einen Aufschwung erhalten. In Bereichen der Sprachassistenten ist es nun auch zunehmend möglich Gespräche und menschlich klingende Sätze zu erhalten. Von einer vollen realen Abbildung kann aber noch keine Rede sein. Ebenfalls ist die reale 3D-Abbildung² des Menschen und eine Übertragung in Echtzeit noch eine ungelöste Herausforderung. Deshalb wird meist für VR-Anwendungen die Agenten-basierte Lösung bevorzugt.

2.2.3 Möglichkeiten der künstlichen Fortbewegung

Die Abbildung der Fortbewegung über unterschiedliche Verfahren ist ein stetig wachsender und weit erforschter Bereich der Human-Computer Interaction. Das Interesse ist nicht nur in der Computer- sondern auch in der Filmindustrie sehr hoch. Mit Hilfe der Aufnahme von realistischer Bewegung können exakte Abläufe und Animationen durchgeführt werden. Dies steigert die Akzeptanz der Figuren in Filmen. Es gibt viele verschiedene Lösungsansätze und die Fachliteratur versucht diese stetig einzuordnen und einheitliche Begriffe zu finden. Ausgehend von dem Nutzenden ergibt sich als übersichtliches Schaubild der aktuellen Situation Abbildung 2-18. In Abbildung 2-18 wurden Begriffe gewählt, die am weitesten verbreitet sind [67], [134], [151], [164], [275]. Im Folgenden wird eine Übersicht über die technischen Möglichkeiten und die Grenzen dieser Bewegungsarten dargelegt.

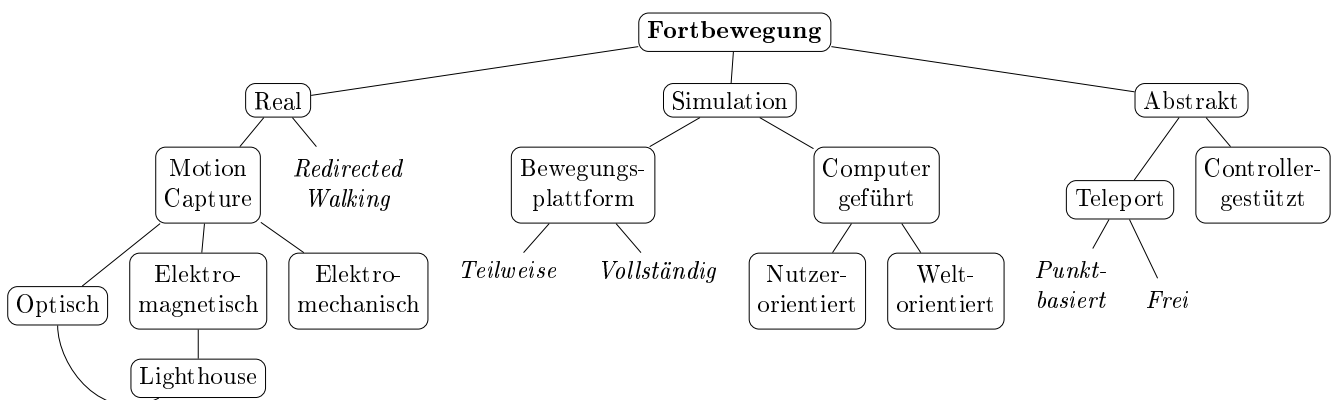


Abbildung 2-18: Umsetzungsmöglichkeiten der Bewegung

i) Reale Fortbewegung

Bei dem Versuch die natürlich reale Fortbewegung aufzunehmen und im Computer als Bewegungsinformation zu bearbeiten, befindet man sich bei der Technologie des sogenannten Motion Capture (dt.

² Dreidimensionalität (3D)

Bewegungserfassung) oder **Motion Capturing**. Ziel dieses Verfahrens ist es möglichst genau die Bewegung des Nutzenden zu erfassen und im Computer wiederzugeben. Da die menschliche Fortbewegung mit zahlreichen Teilbewegungen verschiedener Körperteile zusammenhängt, ist die zu erfassende Datenmenge groß. Dazu kommt die Schnelligkeit einzelner Teilbewegungen und Gesamtbewegungen. Die Anforderungen an die Bewegungserfassung ist demnach die Gewährleistung einer schnellen und genauen Aufnahme von vielen Datenpunkten. Bevor diese Anforderungen durch Technologie erfüllt werden konnten, wurden Bewegungen in Animationen Schritt-für-Schritt einzeln erstellt, was für die reale Fortbewegung keine umsetzbare Möglichkeit ist [134]. In der Praxis haben sich mittlerweile vier verschiedene Verfahren etabliert. Dabei handelt es sich bei drei Verfahren um eigenständige und dem vierten einer Kombination aus zwei Verfahren. Wie in Abbildung 2-18 zu sehen ist, gibt es das optische, das elektromagnetische und elektromechanische Motion Capture sowie das Lighthouse-Tracking entwickelt von Valve. Die Verfahren können für die vollständige Körperaufzeichnung oder für die teilweise Aufnahme von beispielsweise dem Gesicht genutzt werden [134]. Im Rahmen dieser Arbeit beschränkt sich die Aussage auf eine Körper-basierte Aufzeichnung.

Bei den optischen Verfahren werden mittels Kameras auffällige Punkte erfasst [134], [139]. Diese Punkte werden an unterschiedlichen Körperteilen meist über einen hautengen Anzug angebracht und anschließend automatisch detektiert. Durch die reale Bewegung dieser Bildpunkte wird die Positionsänderung erfasst und dem Computer zur Verarbeitung übermittelt. Je nach Anzahl der platzierten Punkte sowie eingesetzter Kameras können die Bewegungen im Detailgrad aufgenommen werden. Ausgeschlossen sind Punkte, welche durch die Kamera nicht gesehen also verdeckt sind. Dieses Verfahren wird meist in der Film- und Computerspielindustrie zur Aufzeichnung und Übertragung von Bewegungsabläufen auf Animationsfiguren verwendet. Ebenfalls zu finden ist diese Art der Bewegungsaufzeichnung bei der Nutzung von VR in CAVEs.

Bei den elektromagnetischen Verfahren wird über Elektromagneten ein magnetisches Feld aufgebaut. Innerhalb dieses Magnetfeldes können Magnetfeldänderungen detektiert und erfasst werden. Diese Änderungen können durch geführte Eingabegeräte oder für die Fortbewegung spezielle Anzüge hervorgerufen werden. Im Gegensatz zu den optischen Verfahren sind hier keine Verdeckungen möglich, dafür verursachen andere magnetische Impulse Störungen und die Reichweite ist gering [134]. Um diesem Problem handhabbar zu werden, hat das Unternehmen Valve das elektromagnetische Verfahren mit dem optischen Verfahren kombiniert. Nachteile beider Systeme können so beseitigt und die Genauigkeit verbessert bzw. Fehleranfälligkeit verringert werden. Im sogenannten Lighthouse-Tracking spannen die zwei Lighthouse-Stationen ein Magnetfeld im Anwendungsbereich auf. Die zugehörigen Hardwarekomponenten wie das Head-Mounted-Display und die Hand-Controller erzeugen die nötige Magnetfeldänderung. Gleichzeitig wird über Infrarot und somit dem optischen Signal Head-Mounted-Display und Hand-Controller detektiert. Mit dieser Kombination konnte das Motion Capture für diese begrenzte Anzahl an Objekten verbessert und beschleunigt werden. Dieses Verfahren wird für VR mittels stationärer Head-Mounted-Displays eingesetzt.

Im Gegensatz dazu findet das Verfahren mittels elektro- oder reiner Mechanik nur spezielle und gezielte Anwendungen. Bei diesem Verfahren wird die nutzende Person mit einem mechanischen Exoskelett ausgestattet und die Bewegung des Exoskeletts erfasst. Der große Vorteil ist der große Bewegungsradius, der dadurch umgesetzt werden kann. Außerdem ist es einfacher mehrere Anwendende gleichzeitig erfassen

zu können [134], [139]. Das Exoskelett kann zusätzlich mit Force-Feedback ausgestattet werden und somit die Immersion steigern. Allerdings schränkt das Skelett mit Gewicht und Mechanik die natürliche Bewegung ein.

Unabhängig des Verfahrens gibt es, wie Jerald [151], Sherman und Craig [275] beschreiben, das von Razzaque et al. [242] entwickelte Verfahren des **Redirected Walking** (dt. Umgeleitetes Gehen). Bei dieser Idee geht es darum den realen Anwendungsbereich der natürlichen Fortbewegung künstlich zu vergrößern, indem in der virtuellen Umgebung unauffällige Umleitungen provoziert werden. Die anwendende Person wird über gezielte Rotationen und Translationen zum ständigen Drehen und Laufen gezwungen, wodurch die Person die realen Grenzen nicht erreicht. Einfach gesagt, dreht sich die anwendende Person stetig im Anwendungsbereich und erhält in der virtuellen Umgebung den Eindruck sich dabei geradeaus zu bewegen. Um dies zu ermöglichen werden gezielte Rotationen und Translationen künstlich vergrößert oder verkleinert. Untersuchungen haben gezeigt, dass diese kleinen Unstimmigkeiten keinen Effekt auf den Anwendenden haben, aber solche Möglichkeiten wie das Redirected Walking ermöglichen [242]. Um diese Technologie anwenden zu können, muss das Design und die Aufgaben in der virtuellen Umgebung meist aufwendig angepasst werden. Dies ist nötig, damit die gezwungenen Drehungen und Bewegungen an der richtigen Stelle zur exakten Zeit durchgeführt werden.

ii) Simulierte Fortbewegung

Neben der realen Fortbewegung und den Schwierigkeiten ihrer Erfassung, gibt es simulierte Verfahren der Fortbewegung. Zu dieser Kategorie zählen die aktuell erforschten Bewegungsplattformen und computergestützte Verfahren. Computergestützte Verfahren können entweder ausgerichtet auf die Nutzenden oder auf die virtuelle Umgebung sein. Bei beiden Möglichkeiten bewegt sich die anwendende Person nicht aktiv und selbstständig fort. Stattdessen wird über definierte Zeitabschnitte eine Positionsänderung unter Umständen auch eine Blickänderung durchgeführt. Bei dem Nutzer-orientierten Verfahren auch Ride-Along [67] genannt, wird dabei die nutzende Person bewegt. Im Gegensatz dazu wird beim Welt-orientierten Verfahren, auch Fly-Through oder Move-The-World [67], die virtuelle Welt bewegt, skaliert und angepasst. Diese Bewegung sind indirekt und müssen softwaretechnisch umgesetzt werden. Beim Einsatz innerhalb VR, AR oder Mixed-Reality kann dies zu Cybersickness führen.

Deshalb eignen sich meistens sogenannte Bewegungsplattformen besser. Diese Plattformen bieten einen definierten Raum für spezielle Bewegungen oder Bewegungsabläufe mit gleichzeitiger Aufnahme zur Verarbeitung im Computer. In Tabelle A-8 und Tabelle A-9 wird ein aktueller Auszug aus der großen Landschaft dieser Plattformen aufgezählt und verglichen. Im Bereich der Bewegungsplattformen als Fahrzeuersatz gibt es durch die fortgeschrittene Automobilindustrie zahlreiche Lösungen. Diese beinhalten eine Sitzgelegenheit, Lenkrad, Fußpedale und weitere unterschiedliche Ausführungen. Fokus lag hier auf der Abbildung der Fortbewegung ohne Fahrzeug, sondern mittels des eigenen Körpers - auch Walking-Style genannt [164]. Oder es wird eine Teilbewegung in abstrahierter Form verwendet, um damit die vollständige Fortbewegung zu nutzen. Es wird beispielsweise auf einem Punkt gelaufen [151], mit einer Art Rollschuh [1] oder mit einer abstrahierten Form der Bewegung z. B. auf einem Stuhl [249] von kleiner Bewegung auf die Fortbewegung geschlossen (siehe Abbildung 2-19 (2)). Dies wird meist aus Platzersparnis angewendet, doch kann hier nicht von einer natürlichen Bewegung gesprochen werden.

Es wird ebenfalls davon ausgegangen, dass dies die Immersion nicht wie gewünscht steigert.

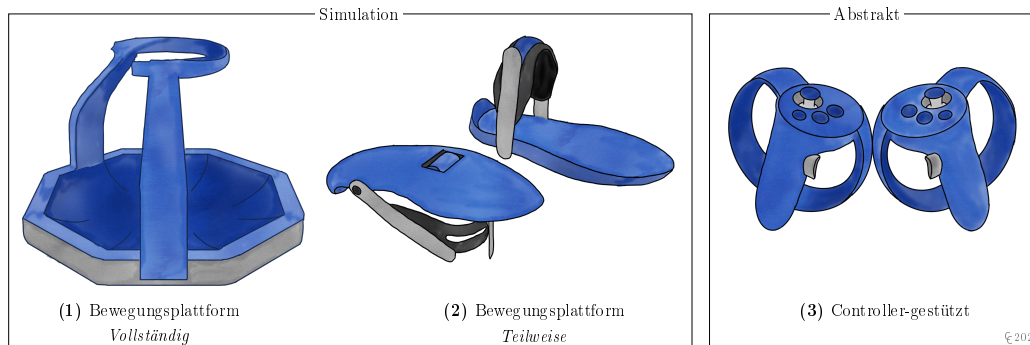


Abbildung 2-19: Beispiele zur Hardwarelösung der simulierten Fortbewegung
(Eigene Darstellung in Anlehnung an [1], [71])

Die vollständigen Bewegungsplattformen dagegen bilden immer mehr ganzheitlich Bewegungen ab. Allerdings sind auch hier die meisten Entwicklungen Prototypen oder Demonstratoren (siehe Abbildung 2-19 (1), Tabelle A-8 & Tabelle A-9). Das Prinzip dieser ist meist ähnlich. Auf einer glatten Oberfläche oder einem Fließband bewegt sich die nutzende Person auf einer definierten Fläche natürlich fort, ohne oder nur gering in der natürlichen Realität vorwärts zu kommen. Manche Bewegungsplattformen ermöglichen zusätzlich Steigungen, wodurch das Berg-Aufgehen oder Treppensteigen möglich ist. Allerdings müssen bei allen Plattformen zur Limitierung der realen Grenzen Einschränkungen in der Bewegungsfreiheit hingenommen werden. So wird die anwendende Person beispielsweise an der Plattform befestigt oder eingehängt. Diese mechanischen Befestigungen limitieren die natürliche Bewegung und somit die Freiheitsgrade.

iii) Abstrakte Fortbewegung

Abschließend gibt es noch die traditionelleren abstrakten Formen der Fortbewegung. Zum einen über Controller oder Eingabegeräte wie Maus, Tastatur und Joystick, welche mit Betätigung bestimmter Kombinationen oder Führung die Positionsveränderung bzw. Blickrichtung verändern ohne dass der natürliche Körper bewegt werden muss. Dies ist die meist verbreitete Art der Fortbewegung in virtuellen Umgebungen. Die Übersetzung der Bewegung verläuft dabei fehlerfrei in Echtzeit und ist durch die geringe Datenmenge auch für viele Nutzende gleichzeitig anwendbar. Visuelle Bewegungsabläufe basieren hierbei auf Animationen, die bei der Bewegung über die Anwendung abgespielt werden. Die künstliche Bewegung hat mit der realen Bewegung wenig zu tun.

Eine weitere abstrakte Form ist mit VR entwickelt worden und wird in diesem Bereich zunehmend eingesetzt. Es handelt sich hierbei um die Technik des Teleports, oder auch Magic-Style [164] bzw. Point-And-Fly [151] genannt. Wie letzterer Name bereits sagt, zeigt die anwendende Person in der virtuellen Umgebung mittels der Hand-Controller in einer natürlich realen Bewegung auf einen Bodenpunkt (siehe Abbildung 2-19 (3)). Bei Bestätigen der Teleportation wird die nutzende Person an den ausgewählten Punkt versetzt, ohne sich selbst fortbewegt zu haben. Mit dieser Technik können Bewegungen über die realen Grenzen hinaus in einem begrenzten Anwendungsbereich bequem durchgeführt werden. Der

Teleport wird dabei in einigen Anwendungen als reine punktbasierte Möglichkeit umgesetzt. Der Teleport ist demnach eine einfache Möglichkeit der Fortbewegung, welche in Bereich der stationären VR oftmals eingesetzt wird. Allerdings fehlt auch hier die reale Fortbewegung des Anwendenden. Deshalb wird manchmal die Teleportfunktion mit der realen Fortbewegung in einem beschränkten Anwendungsbereich z. B. über das Lighthouse-Tracking ermöglicht und umgesetzt.

2.2.4 Zusammenfassung der Mensch-Maschine Interaktion

In diesem Kapitel wurden die technologischen Möglichkeiten vorgestellt, welche die Interaktion des Menschen mit dem Computer - der Maschine beschreiben. Diese werden zusammengefasst unter dem Begriff Human-Computer Interaction. Dabei wurde gezeigt, dass Interaktion immer aus einer Aktion und Reaktion besteht und dass die Reaktion meist die Interpretation, der vom Anwendenden durchgeführten Aktion ist. Mittels unterschiedlicher Eingabegeräte ist es heutzutage dem Menschen möglich mit der virtuellen Umgebung dynamisch und in Echtzeit zu interagieren. Es wurden aber auch abstrakte Verfahren vorgestellt, wie mit Hilfe softwareseitiger Lösungen z. B. Agenten Interaktionen übernommen werden können. Es wurde darauf aufmerksam gemacht, dass jedes aktive Eingabegerät den Nutzenden in den Freiheitsgraden einschränkt, weshalb oftmals passive Geräte wie Sensoren verwendet werden.

Anschließend wurden die speziellen Formen der Interaktionen Kommunikation und Kollaboration sowie Fortbewegung beleuchtet. Im Rahmen der Kommunikation wurde das weit fortgeschrittene System von text- und sprach-basierten Verfahren aufgezeigt und aktuelle Entwicklungen im Bereich einer natürlichen Kommunikations- und Kollaborationsform mit einem natürlichen Körpergefühl beschrieben. Zum Übergang werden deshalb aktuell Agenten-basierte Verfahren genutzt, die entweder einen weiteren Anwendenden oder die Maschine als künstliche Person widerspiegeln.

Im Anschluss wurde die menschliche Fortbewegung und deren Nutzung für Human-Computer Interaction beschrieben. Aktuelle Forschung und prototypische Entwicklungen versuchen natürliche Körperbewegung in die Maschine zu übersetzen. Es wurden verschiedene Verfahren zur Erfassung von Bewegung aufgezeigt und mit den traditionellen Verfahren mittels Eingabe über Maus und Tastatur verglichen. Daneben wurde in einer breiten Sammlung an Bewegungsplattformen (siehe Tabelle A-8 & Tabelle A-9) Unterschiede und Möglichkeiten dieser Zwischenlösung aufgezeigt.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass im Bereich der Human-Computer Interaction eine Vielzahl an Lösungen und Lösungsansätzen existieren, um die Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine so einfach und intuitiv wie möglich zu gestalten. Dabei wird immer wieder Bestehendes kombiniert, was die Einordnung in einzelne Kategorien schwierig macht. Deshalb wurde mit der Abbildung 2-16, Abbildung 2-17 und Abbildung 2-18 allgemeine Übersichten geschaffen, welche das komplexe Feld der Interaktionen klarer formuliert.

2.3 Immersion und das Gefühl von Präsenz

Wenn man sich mit der Frage beschäftigt, wie künstliche Realität funktioniert und Computeranwendungen natürlich z. B. in VR durchgeführt und erlebt werden können, tauchen unweigerlich die Begriffe der Immersion und Präsenz auf. Dabei werden beide Begriffe fälschlicherweise oft Synonym verwendet. Es ist wichtig diese klar voneinander abzugrenzen, auch wenn beide Begriffe sehr voneinander abhängig

sind und ohne einander nicht existieren. Das folgende Kapitel soll Immersion und Präsenz erklären und herausarbeiten, wozu diese benötigt werden. Es soll gezeigt werden, was die positiven Effekte eines immersiven Erlebnisses sind und wie dieses künstlich gesteigert werden kann. Daneben soll ein Einblick in die gängigen Theorien zur Cybersickness oder auch Motion-Sickness, welche bei falsch eingesetzten Techniken die Präsenz zerstören, gewährt werden. Anschließend sollen die Möglichkeiten erwähnt werden, die dazu dienen die Immersion und Präsenz zu messen und damit wissenschaftlich greifbar zu gestalten.

2.3.1 Definition von Immersion und Präsenz

Im Duden wird Immersion als *„Eintauchen in einer virtuellen Umgebung“* definiert [28]. Huff [143] geht hier weiter und beschreibt die Immersion als *„[...] Grad des Eintauchens in eine virtuelle Realität (VR). Die Immersion ist ein wesentliches Medienmerkmal und wird definiert als das Ausmaß, in dem die eingesetzte Technologie in der Lage ist, eine einschließende, intensive, umfassende und lebendige Illusion der Realität zu liefern. [...]“*. Das Wort Immersion, auch oft Immersivität genannt, kommt vom lateinischen *immergere*, welches eintauchen und versinken bedeutet [28]. Dabei geht es unabhängig der verwendeten Technologie der Digitalen Realität immer darum den Nutzenden in die virtuelle Umgebung mit zu nehmen und das Gefühl von natürlicher Realität zu vermitteln. Slater [281] hat sich mit den Begriffen Immersion und Präsenz detailliert auseinandergesetzt und wird in der gängigen Literatur vermehrt und grundlegenden zitiert. Slater [281] beschreibt die Immersion als eine objektive Beschreibung der Technologie und die Nutzung von verschiedenen Sinnen. Dieser Meinung schließen sich Baños et al. [18], Jerald [151] und Meehan et al. [203] an und Huff [144] definiert das Erlebnis *„[...] umso immersiver, je mehr Sinnesmodalitäten angesprochen werden, ferner je höher die Geschwindigkeit der Informationsverarbeitung und je größer die Anzahl bereitgestellter Verhaltensmöglichkeiten ist.“* Diese Aussage bestätigt sich durch die von Sherman und Craig [275] beschriebene Methode mit mehr Sinnen die Objektrealität zu steigern. Jerald [151], Sherman und Craig [275] betonen, dass Immersion ein Mittel ist, um den Anwendenden natürlich und angenehm durch die vorgestellte Anwendung zu führen, ohne dabei die Empfindungen vollständig kontrollieren zu können. Wichtig ist hierbei die durchgängige Bespielung der Sinne mit künstlichen Reizen.

Mit der Immersion entsteht das Gefühl der Präsenz. Das Wort Präsenz stammt vom lateinischen *praesens* und bedeutet anwesend bzw. gegenwärtig. Deshalb *„[...] versteht man [unter Präsenz] die erlebte Anwesenheit in einer computergenerierten virtuellen Welt. Die Intensität des Präsenzerlebnisses ist in der Hauptsache eine Funktion der Immersion [...]“* [346]. Es handelt sich nach Slater [281] um die subjektive psychologische Aufarbeitung des Anwendenden als Antwort auf die virtuelle Umgebung und spiegelt ein Gefühl von Vor-Ort zu sein wider, auch wenn das klare Bewusstsein weiß nicht dort zu sein [275]. Präsenz ist also nicht nur das Gefühl Vor-Ort zu sein, sondern auch die persönliche Affinität sich auf das immersive Erlebnis einzulassen [18], [203], [281]. Somit ist die Präsenz eine Funktion aus Immersion und der subjektiven Erfahrung, Verständnis der Wahrhaftigkeit und Einfühlungsvermögen des Anwendenden [151], [275].

Um diese Theorien zu bestätigen haben Baños et al. [18] verschiedene Hardwaresysteme wie die Nutzung eines klassischen Computers mit Monitor, einer Power-Wall und einer VR-Anwendung mittels Head-Mounted-Display mit zwei unterschiedlichen Szenarien durchgeführt. Eines der Szenarien war

emotional, das andere objektiv. Als Ergebnis mit 16 Testpersonen bleibt, dass das emotionalere Szenario unabhängig des Hardwaresystems immersiver ist. Gleichzeitig konnte gezeigt werden, dass die Nutzung von VR im Vergleich zu 3D-Anwendungen die größte Immersion und somit Präsenz lieferte. Die Präsenz hängt demnach vom genutzten Hardwaresystem, dem Inhalt der virtuellen Umgebung und dem Nutzenden ab. In dem objektiven Szenario beruht das Erlebnis und das Gefühl von Präsenz hauptsächlich auf der Immersion, weshalb diese bei Anwendungen der Ingenieurwissenschaften umso wichtiger ist.

2.3.2 Beschreibung des Körpergefühls

Präsenz beschreibt das Gefühl Vor-Ort zu sein. Für dieses Gefühl ist die künstliche Repräsentation, die Bewegung des Körpers und die Interaktion mit der virtuellen Umgebung entscheidend. Dies kann zum einen die Übernahme von Bewegungen wie z. B. 360°-Drehung in die virtuelle Umgebung sein. Ist aber zum anderen stärker, wenn eine physische Abbildung des Körpers z. B. mit Händen, Körper oder Schatten umgesetzt ist [135]. Man spricht davon den Anwendenden über einen Agenten bzw. Avataren als virtuelle Repräsentation seiner bzw. ihrer selbst zu visualisieren [67], [135]. Es gibt hierfür verschiedene Ansichten und Umsetzungsformen. Für das Gefühl der Präsenz eignen sich die sogenannte First-Person-View am besten. Hier schlüpft die nutzende Person als eine 1-zu-1-Repräsentation in den virtuellen Körper und somit entspricht das Kamerabild den Augen bzw. Blick des Nutzenden. Andere Formen wie der Third-Person-View bei dem die nutzende Person eine beobachtende Stellung einnimmt und über den eigentlichen Avataren schwebt sind nur bis zu einem kleinen Grad des Körpergefühls geeignet. Das Körpergefühl besteht aus einem Besitzgefühl, also der Erkenntnis dass der repräsentierte Körper der Eigene ist. Verortung, Verhalten und Aussehen müssen vom Anwendendem akzeptiert und auf den natürlichen Körper übertragen werden. Man spricht hierbei auch von der Body-Ownership-Illusion (dt. Körper-Besitztums-Illusion) [275]. Wichtig ist dass die Repräsentation des virtuellen Körpers mit den Sinnesindrücken übereinstimmt und es zu keiner semantischen Diskrepanz kommt. Das Körpergefühl und somit die Präsenz werden nachhaltig gestört, wenn Avatare und natürliche Körper nicht übereinstimmen oder anatomisch nicht plausibel sind [275]. Oftmals werden nur Körperteile wie die Hände visualisiert, um Diskrepanzen zu vermeiden [74]. Es ist allerdings für das Körpergefühl besser je mehr vom Körper visualisiert wird, solange die exakte Übereinstimmung gewährleistet ist [275].

2.3.3 Positive Effekte durch Immersion und Präsenz

Es stellt sich die Frage, ob es erstrebenswert ist die Immersion und Präsenz in Anwendungen der Digitalen Realität zu nutzen und bei der Entwicklung darauf zu achten, dass diese in der virtuellen Umgebung entstehen. Untersuchungen von Bowman und McMahan [39] zeigten, dass Aufgaben, die das Auffinden von Objekten betreffen, in Anwendung mit einer hohen Immersion (durch 360°-Ansicht) doppelt bis dreifach so schnell erledigt werden konnten. Ebenfalls konnten anschließend Wissensfragen zehnmal richtiger beantwortet werden als bei vergleichbare Wissensgewinnung ohne Immersion [39]. Diese Ergebnisse konnten Heydarian et al. [140] in ihrer Studie mit 112 Teilnehmern bestätigen. Hier wurde eine exakte virtuelle Abbildung einer natürlichen Umgebung implementiert und die Geschwindigkeit und Fehlerrate bei der Aufgabenbewältigung in der natürlichen und virtuellen Umgebung gemessen. Es stellte sich heraus, dass die Lesegeschwindigkeit in der virtuellen Umgebung aufgrund der geringen Auflösung

von Head-Mounted-Displays (siehe Tabelle A-1) geringer, dafür die Aufgabenbewältigung und das Verständnis zum Inhalt schneller umgesetzt wird. Ke et al. [156] stellten in ihrem Versuch die Vorteile von zeit- und ortsunabhängigen Anwendungen heraus, die durch die Nutzung von virtuellen Umgebungen entstehen. Wenn diese eine hohe Präsenz erzeugen, können Situationen wie in ihrem Fall des virtuellen Klassenraums eindrucksvoll nachgestellt werden [156]. Szenarien, Situationen und im realen aufwendig vorzubereitende Objekte können damit ohne Einschränkungen in einer natürlichen Weise genutzt werden. Dies untermalt Gruchalla [122] in ihrer Studie bei der immersive und nicht immersive Anwendungen in Form von virtuellen Umgebungen und traditionellen Anwendungen miteinander verglichen werden. Das Ergebnis zeigt das immersive Anwendungen für das Verständnis, Akzeptanz und Motivation besser geeignet sind.

Im Bereich der Ingenieurwissenschaften sind die Ergebnisse von Bowman und McMahan [39] von Interesse, da diese zeigen, dass durch die Bildung und dem Einsatz einer immersiven virtuellen Umgebung das räumliche Verständnis steigt. Die Anforderungen an die subjektive Interpretation und Vorstellungsgabe wird in VR-Anwendungen drastisch gesenkt. Dadurch können traditionell entstehende Informationslücken verringert und die Aufgaben mit räumlichem Bezug wesentlich schneller absolviert werden.

2.3.4 Möglichkeiten zur Steigerung der Immersion und Präsenz

Nachdem nun klar ist, dass es erstrebenswert ist die Immersion und somit auch die Präsenz für Computer- und Ingenieur Anwendungen zu nutzen, stellt sich die Frage wie Immersion und damit auch das Gefühl von Präsenz gesteigert werden kann. Bereits 1992 stellte Heeter [135] fest, dass die Präsenz höher ist, wenn

- ein möglichst großes Körpergefühl vorhanden ist.
- die virtuelle Umgebung vertraut und bekannt gestaltet ist.
- mehrere Anwendende in der gleichen virtuellen Umgebung kollaborativ und kommunikativ zusammenkommen.
- die physikalischen Gesetze ähnlich der natürlichen Realität gelten und in sich schlüssig sind.
- mehr Sinneswahrnehmungen in der virtuellen Umgebung gereizt werden [18], [156], [362].

Sherman und Craig [275] beschreiben in Bezug zu den Entwicklungen von Disney nehmend, dass auch virtuelle dynamische Elemente in statischen virtuellen Umgebung die Präsenz steigern können. So werden Effekte wie beispielsweise Staub in der Luft, Lichtspiegelung in Partikeln oder Wasserbewegungen genutzt, um die Immersion und damit Präsenz zu steigern. Der verbreitetste Ansatz ist die Immersion, wie es auch in der Definition beschrieben ist, mit der Nutzung bzw. Reizung von mehr Sinneswahrnehmungen zu steigern. Es gibt hierzu einige Forschungen, die zeigen, dass mit dem Einsatz mehrere verschiedener Sinnesreize eine größere Immersion und damit eine gesteigerte Präsenz erreicht werden kann [18], [156], [275], [362]. Zyda [362] zeigt in ihrer Anwendung mit Reizung der auditiven, haptischen und visuellen Wahrnehmung, dass die Präsenz wie auch die Nutzungsmotivation steigt. Dies wurde mit einer Anwendung basierend auf einer reinen visuellen Reizung verglichen. Es hat sich herausgestellt, dass die olfaktorische Wahrnehmung den größten unbewussten Effekt zur Steigerung der Präsenz besitzt. Dinh et al. [78] verglichen den Anstieg der Präsenz mit der Verwendung besserer Graphik und dem Einsatz von Geruchsstoffen und stellten fest, dass der Geruch einen größeren Einfluss hat

als die Graphikverbesserung. Amores et al. [9] und Serrano et al. [273] weisen nach, dass das Bespielen der olfaktorischen Wahrnehmung die Wahrnehmung von Schmerz, Erholung und das Gefühl Vor-Ort zu sein begünstigt. Den großen Einfluss der olfaktorischen Wahrnehmung auf die Immersion und Präsenz wird von zahlreichen Quellen bestätigt [9], [54], [132], [152], [212], [273], [308]. Jones et al. [152] untersuchten unterschiedliche Arten von Gerüchen und stellten fest, dass negative Gerüche -sprich Gestank- einen bewussteren Einfluss haben als positive Gerüche. Serrano et al. [273] zeigen, dass dies für die haptische Wahrnehmung ebenfalls zutrifft. Es kann festgehalten werden, die Bespielung der Sinne einen großen Einfluss auf die Erhöhung der Präsenz besitzt.

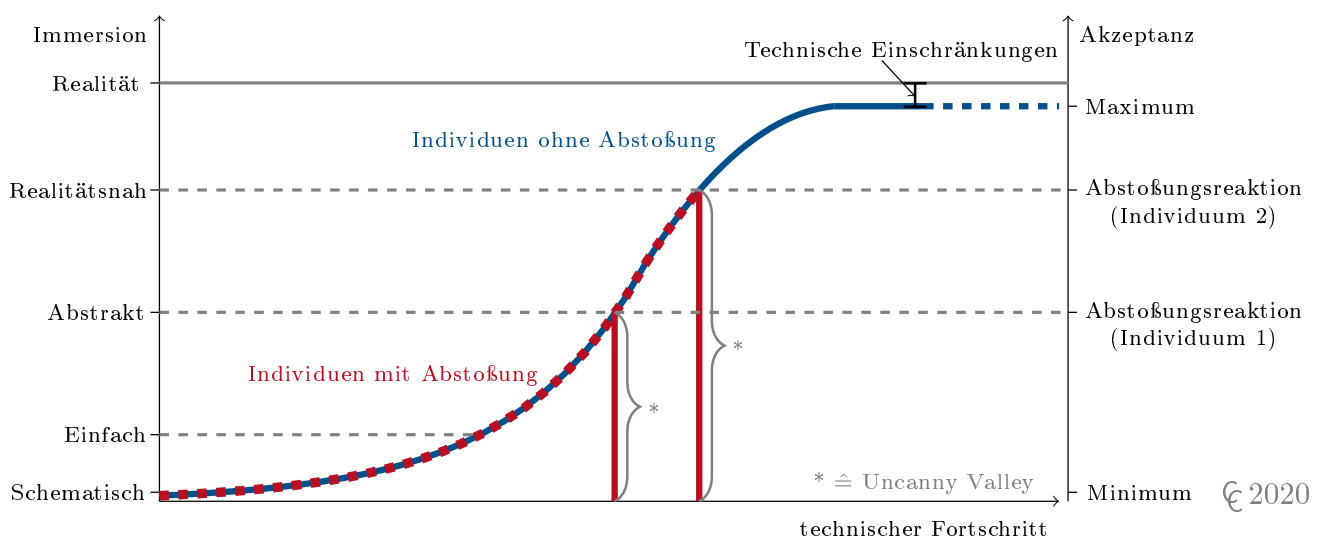


Abbildung 2-20: Die Akzeptanz in Bezug auf den Fortschritt und die Immersion (Eigene Darstellung in Anlehnung an [210])

Auch das genutzte Medium und das verwendete Hardwaresystem sind für die Präsenz entscheidend. Bowman und McMahan [39] zeigen mit Ihrer Messung zur Schnelligkeit und Genauigkeit für zielgerichtete Aufgaben mit verschiedenen Systemen, dass die Displaygröße und Auflösung einen Effekt haben. Sie kristallisieren heraus, dass VR-Systeme im CAVE-System am besten geeignet sind und die Präsenz hier am größten ist. Gefolgt von VR-Systemen mit Head-Mounted-Display und das Medium der Power-Wall. Dies bestätigen Kim et al. [161] und Krijn et al. [166].

Zu erwähnen ist, dass die Immersion und Präsenz nicht unbegrenzt erhöht werden können. Bereits 1971 beschreiben Mori et al. [210] den Zustand des *Uncanny Valley* (dt. unheimliches Tal). Dieser besagt, dass die Akzeptanz künstlicher Anwendungen, Objekte, Abbildungen oder Repräsentationen kurz vor dem Erreichen des natürlichen Realismus abrupt abnimmt (siehe Abbildung 2-20). Es kann also durch alle Maßnahmen und durch Verbesserung der virtuellen Umgebung die Steigerung theoretisch nur bis zu einem nutzungsabhängigen Maß erreicht werden. Wenn die Anwendung in ihrer Entwicklung so realistisch wirkt, aber in kleinen Feinheiten noch nicht realistisch ist, findet eine Abstoßungsreaktion statt und die Anwendung wird vom Nutzenden nicht angenommen, oftmals sogar gefürchtet. Beispiele mit Avataren, die ein hochauflösendes realistisches Erscheinungsbild mit realistisch wirkender Mimik besitzen, zeigen dass die Theorie von Mori et al. [210] durchaus zutrifft. In Abbildung 2-20 wurde die Akzeptanz als Funktion des technischen Fortschritts und der Immersion aufgetragen. Dabei wird der

Uncanny Valley an mehreren Stellen angesetzt, da unterschiedliche Anwendende anders reagieren. Es gibt also theoretisch eine maximale Akzeptanz, die mittels der Immersion und dadurch entstehen Präsenz erreicht werden kann. Das Ziel zukünftiger Entwicklungen sollte es sein diesen maximalen Wert zu erreichen.

2.3.5 Negative Folgen falscher Immersion und Präsenz

Neben dem Uncanny Valley (siehe Abbildung 2-20) gibt es weitere negative Auswirkungen beim Einsatz neuer Technologien und Medien. Bereits zu Beginn des Einsatzes von immersiven Anwendungen - bei Flugsimulatoren für das Training von Piloten - traten Nebenwirkungen in Form von Übelkeit, Schwindel und Gleichgewichtsproblemen auf [158]. Man analysierte die Symptome und fand heraus, dass zusätzlich zur Übelkeit und Schwindel auch Erscheinungen von trockenem Mund, kaltem Schweiß, visuellen Unstimmigkeiten, Blässe, Schwitzen, Erbrechen, Orientierungslosigkeit, Müdigkeit, Kopfschmerzen und Gleichgewichtsstörungen dazu kamen [37], [158], [164], [172]. Dabei treten die Symptome nicht alle auf und je nach Anwendung und der nutzenden Person in unterschiedlicher Schnelligkeit, Intensität und Kombination. Diese Symptome wurden unter dem Begriff Motion-Sickness (dt. Bewegungskrankheit) oder vermehrt auch als Cybersickness bzw. Simulator-Sickness bekannt. Da Motion-Sickness auch für die Reisekrankheit z. B. in der Seefahrt steht und es tatsächlich in den Symptomen und wohl auch in der Ursache Parallelen aber auch Unterschiede gibt, wird zur klaren Abgrenzung in dieser Arbeit die Bezeichnung Cybersickness bevorzugt. Ein wesentlicher Unterschied zur Reisekrankheit ist, dass die Symptome meist schnell nach Beendigung der immersiven Anwendung verschwinden [37], [158]. Bei der klassischen Motion-Sickness muss eine tatsächliche Körperbewegung ausgeführt werden, wohingegen bei der Cybersickness die reine Visualisierung ausreichend ist [172].

Da man die Symptome bald erkannte, versuchte man auch die Ursachen dieser Körperreaktionen zu finden und in den Griff zu bekommen. Mit Hilfe der von Kennedy et al. [158] durchgeführten Feldstudie mit 517 Teilnehmern sammelte man bereits erwähnte Ergebnisse. Diese Ergebnisse führten zu verschiedenen Theorien zur Ursache der Cybersickness, welche LaViola [172] in drei Arten zusammenfasst. Zum einen gilt die Theorie des Vergiftungsverhaltens und der Haltungsinstabilität, zum anderen die sensorische Konflikttheorie.

Bei der Theorie zur Vergiftung handelt es sich um eine evolutionär bedingte Annahme aufgrund dessen der Mensch mit sensorischen Halluzinationen auf den Verdacht einer Vergiftung, also der falschen Nahrungszunahme, reagiert. Dies ist ein Überlebensmechanismus, der den Nutzenden zum Erbrechen bewegt, um somit alle toxischen Stoffe aus dem Magen und Körper zu entfernen [37], [172]. Bei dieser Theorie fehlt allerdings eine Erklärung zur breiten Streuung der Symptome und die unterschiedlichen individuellen Reaktionen auf dieselbe Anwendung.

Die zweite Theorie zur Haltungsinstabilität als Ursache basiert auf der Grundsatzidee, dass der Mensch in seiner natürlichen Umgebung nach Stabilität des Körpers strebt. Deshalb führt eine Instabilität z. B. durch das plötzliche Wechseln der Umgebung oder einer unerwarteten Erfahrung zur Cybersickness. Dies würde erklären, warum visuelle Veränderungen in immersiven Anwendungen oftmals zur Cybersickness führen. Dennoch erklärt sie nur einen Teil der Symptome und nicht die Individualität des Auftretens.

Die älteste und meist anerkannte Erklärung ist demnach die sensorische Konflikttheorie. Diese Theorie sieht die Ursache der Cybersickness in der Diskrepanz zwischen der visuellen Wahrnehmung und den

Gleichgewichtssinn bzw. auch der Wahrnehmung der anderen Sinne. Stimmen die Eindrücke und Interpretationen nicht überein, reagiert der Körper mit heftigen Symptomen, um diesen aus der Situation zu bewegen. Es ist nachweislich zu beobachten, dass bei Anwendungen, in denen das Individuum bewegt wird, ohne dies in der natürlichen Realität ebenfalls zu tun, Cybersickness hervorruft [158]. Auch diese Theorie ist nicht bewiesen und kann die individuellen Unterschiede zwischen einzelnen Anwendenden nicht erklären. In der Konflikttheorie geht man aber davon aus, dass es zum Eintreten oder nicht Eintreten der Krankheit kommt, je nach subjektiver Vorerfahrung und Präferenz mit den Unstimmigkeiten umzugehen. So zeigte sich, dass bei mehrmaliger Ausführung des Fehlers die Symptome schwächer und somit die Cybersickness weniger heftig auftreten [151], [172]. Es findet eine Adaption statt.

Technisch betrachtet sind die Ursachen für die Diskrepanzen meist Latenzen. Latenzen sind Verzögerungen in den verschiedensten Bereichen wie Berechnung, Übertragung oder Messung im Hardwaresystem. Wenn also das Bild aufgrund von Signalstörungen nicht schnell genug zum Ausgabegerät wie Head-Mounted-Display übertragen wird oder die Tracking-Methode die Position kurzzeitig nicht in Echtzeit bestimmt, treten Latenzen auf. Die Gefahr von Cybersickness steigt aber auch bei fehlerhaftem oder ungenauem Positions-Tracking, Bildflackern im Display, oder durch individuelle Charaktereigenschaften wie die subjektive Affinität, das Alter, das Geschlecht und der vorhandene Adaptionsgrad [151], [172]. Aus diesem Grund haben einige Forschungen untersucht, wie sich verschiedene immersive Systeme mit Cybersickness verhalten. Meist wird dies mit dem Simulator Sickness Questionnaire (dt. Cybersickness Fragebogen) von Kennedy et al. [158] oder dem Vorgänger dem Motion Sickness Questionnaire (dt. Bewegungskrankheits-Fragebogen) abgefragt und bestimmt [37]. Baños et al. [18] führten eine Studie mit 16 Testpersonen durch und stellten fest, dass Cybersickness vermehrt mit Head-Mounted-Displays auftreten. Kim et al. [161] bestätigen dieses Ergebnis und betonen, dass die Nutzung einer CAVE für VR weniger Komplikationen verursacht. Bessere Ergebnisse sind nur bei der Nutzung traditioneller Computerbildschirme aufgetreten.

Es gibt auch Versuche die Cybersickness dauerhaft zu vermeiden. So erklärte Sherman und Craig [275], dass die Erhöhung der Bildrate von ursprünglich 30 Hz auf 60 Hz und mittlerweile meist auf 90 Hz das Flackern und Cybersickness reduziert. Genauso zeigen LaViola [172], Duh et al. [84] und Fernandes und Feiner [111], dass das Sichtfeld (FOV) (engl. Field of View) eine erhebliche Auswirkung hat und die Verringerung auch das Auftreten der Krankheit senkt. Fernandes und Feiner [111] schlagen hier einen dynamischen Ansatz vor, bei der softwareseitig das Sichtfeld verändert wird, je nachdem ob eine Bewegung stattfindet oder nicht. Es konnte nachweislich gezeigt werden, dass es mit diesem Ansatz möglich ist, länger in der immersiven virtuellen Umgebung zu verweilen. Duh et al. [84] haben dabei gezeigt, dass bei Bewegungen in detaillierten virtuellen Umgebungen ein Sichtfeld von 90°-120° ausreicht, da innerhalb dieses Bereichs dem Nutzenden die Reduktion nicht auffällt. Andere Ansätze kommen von Whittinghill et al. [344], die die Cybersickness mittels Einblendung einer virtuellen Nase reduzieren. Burns et al. [48] schlagen vor, starre Elemente wie beispielsweise Wände in der virtuellen Umgebung nicht zu visualisieren, damit die nutzende Person keine fixen Orientierungspunkte für das Gleichgewicht besitzt. Einen drastischeren Ansatz empfehlen Soomro et al. [289], welche die Rotation der Kopfbewegung virtuell nicht visualisieren und damit kurzzeitig das Bild sperren und schwärzen bis die Drehung vorbei ist. Ähnlich wie beim Teleport wird kurzzeitig die Bewegung eingefroren und somit zu viele bewegte Bilder vermieden. Dies begründen sie damit, da ihre Untersuchung ergeben hat, dass

die Cybersickness häufiger bei Rotationen als bei Translationen auftritt.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass zum aktuellen Stand die wahren Ursachen für Cybersickness noch nicht geklärt sind und somit die Mangelercheinung noch nicht vollständig ausgeschlossen werden kann. Grundsätzlich kann man aber sagen, dass unstimmmige Sinneseindrücke und Bewegungen, sowie fehlerhafte Informationen oder Anzeigen zu Cybersickness führen und deshalb vermieden werden sollten.

2.3.6 Messung der Immersion und Präsenz

Die Frage ist wie Immersion oder Präsenz bestimmt oder gemessen werden können. Aus der Definition der Immersion geht hervor, dass „[...] je mehr Sinnesmodalitäten angesprochen werden [...]“ [144] desto immersiver ist das Erlebnis. Auch Baños et al. [18] und Slater [281] beschreiben die Immersion, als objektiven Grad, zusammengesetzt aus der Anzahl der genutzten Sinne. Die Präsenz dagegen formulieren sie als subjektive Erfahrung, die als solche nur vom Anwendenden bewertet werden kann. Sherman und Craig [275] schlagen die Messung über technische Faktoren wie die Multimodalität, die Anzahl der Sinne, die Latenz, die Auflösung, Anzahl der Nutzenden, den Interaktionsspielraum, die Isolation zur natürlichen Umgebung und die umgesetzte Detailstufe jedes Sinnes vorzunehmen. Von Messung kann hier allerdings keine Rede sein, da es für die einzelnen Faktoren wie beispielsweise Detailstufe der Sinne keine mathematische Grundlage gibt. Ein biologischen Ansatz versuchten Meehan et al. [203] und messen die Herzrate, den Puls und die Hauttemperatur während der Durchführung verschiedener detaillierter Anwendungen. Allerdings konnten sie keine Rückschlüsse von den gemessenen Werten auf Präsenz oder Immersion ziehen. Im Rahmen der Präsenzforschung in der Psychologie werden unabhängig von immersiven Anwendungen Fragebögen verwendet. Dabei werden vor und nach dem jeweiligen Erlebnis Fragen an den Anwendenden gestellt und ausgewertet. Meist wird dieser Lösungsansatz angewendet. Erstmals Chalmers und Ferko [52] veröffentlichten 2010 eine mathematische Gleichung als Vorschlag zur Berechnung der Wahrnehmung als Synonym von Immersion (siehe Formel 2.1).

$$P(t, \rho) = \omega_v V + \omega_a A + \omega_s S + \omega_t T + \omega_f F \quad (2.1)$$

mit: V := Visuelle Wahrnehmung (engl. visual perception)

A := Auditive Wahrnehmung (engl. audio perception)

S := Olfaktorische Wahrnehmung (engl. smell)

T := Gustatorische Wahrnehmung (engl. taste)

F := Haptik (engl. feel)

$W_\omega := \{0, 1\}$

ω_i := Wichtungsfaktor mit $\sum \omega_i = 1$

So wie es Baños et al. [18] und Slater [281] vorschlagen, wird die Anzahl der Sinne mit einem Wichtungsfaktor summiert und als Grad der Immersion verwendet. Hierbei beschreiben die Autoren, dass die Festlegung der Wichtungsfaktoren die größte Herausforderung darstellt. Diese sollen anhand von spezifizierten Beispielen und empirischen Studien für einzelne Fälle definiert werden. Allerdings liegt hier die größte Schwierigkeit. Einen objektiven Vorschlag, wie diese Wichtungsfaktoren bestimmt oder ermittelt werden können, gibt es nicht und wird wohl auch schwer zu finden sein.

Eine Messung von Immersion und Präsenz ist zum jetzigen Zeitpunkt objektiv noch nicht möglich, aber von einigen angestrebt. Immersion sollte hierbei ein Grad der verwendeten Sinne und Präsenz eine Bewertung des Gefühls Vor-Ort zu sein widerspiegeln. Eine objektive und damit repräsentative Lösung ist anzustreben.

2.3.7 Zusammenfassung zu Immersion und Präsenz

In diesem Kapitel wurde der Zusammenhang zwischen Immersion und Präsenz erläutert. Die Immersion ist das Eintauchen und aktive Erleben der virtuellen Umgebung mit der maximalen Anzahl an Sinnen. Präsenz ist das Gefühl tatsächlich in dieser virtuellen Umgebung zu sein, also ein Gefühl von eigener Anwesenheit und Vor-Ort-Sein zu verspüren.

Durch den Nachweis von größerem Nutzerverständnis, Informationsaufnahme und Beschleunigung von Aufgabenbewältigungen, kann der Mehrwert von immersiven Anwendungen im Verhältnis zu traditionellen Anwendung gesehen werden. Die Immersion und damit einhergehende Präsenz kann allerdings aufgrund des Uncanny Valley nur bis zu einem gewissen Maß an die natürliche Realität reichen und kann bei fehlerhafter oder ungenauer Umsetzung zu Cybersickness führen.

Versuche die Immersion oder Präsenz zu messen oder objektiv zu bewerten sind bisher nicht erfolgreich gewesen. Lediglich in Fragebögen können einzelne Aussagen über diese getroffen werden. Ein Ziel dieser Arbeit ist es, eine objektive Möglichkeit zu schaffen, um den Realismus einer Anwendung zu bewerten.

2.4 Zusammenfassung der Grundlagen

Innerhalb dieses Kapitels wurden die Grundlagen zum Verständnis der menschlichen Wahrnehmung, der Schnittstelle von Mensch zur Maschine, den Einflüssen und Entstehungsgründen von Immersion und Präsenz und deren Abhängigkeit zueinander erläutert. Zu Beginn wurde die Funktionsweise der menschlichen Wahrnehmung für jeden Sinn beschrieben und Möglichkeiten der künstlichen Reizung über verschiedene Displayarten aufgezeigt. Dabei wurde klar, dass mit Ausnahme der auditiven Wahrnehmung, alle künstlichen und digitalen Methoden zur Bespielung der Sinne den vollständigen Funktionsumfang der natürlichen Wahrnehmung nicht widerspiegeln können. Im Zuge dessen wurden die Begriffe der natürlichen und künstlichen Realität eingeführt. Die natürliche Realität als uns bekannte reale Umgebung, in der sich der Mensch in seiner Natürlichkeit befindet. Zum anderen der künstliche Aufbau einer virtuellen Umgebung mit gleichzeitiger affektierter Sinnesreizung als künstliche Realität.

Zur Interaktion des Menschen mit der virtuellen Umgebung sind Mensch-Maschine-Schnittstellen notwendig. Diese wurde in Bezug für die allgemeine Interaktion, aber auch für die Fortbewegung und Kommunikation näher betrachtet. Hardwarelösungen wurden analysiert und der Trend beobachtet, dass es eine Bestrebung gibt, diese so weit wie möglich an die natürliche Realität anzupassen. Gleichzeitig wurde die Vielzahl an unterschiedlichen Möglichkeiten zur Interaktion beleuchtet.

Mit Hilfe der Mensch-Maschine-Schnittstellen kann in eine virtuelle Umgebung eingetaucht werden, was als Immersion bezeichnet wird. Diese Immersion abhängig der Anzahl und Nutzungsgrade künstlicher Wahrnehmungsreizung, produziert ein Gefühl von Vor-Ort sein, welche als Präsenz definiert ist. Beide Zustände wurden genau definiert und deren Entstehung, sowie Möglichkeiten der Steigerung erklärt. Daneben wurden positive Effekte der Steigerung und negative Folgen aufgrund von Nebenwirkungen

aufgezählt. Trotz zahlreicher Forschung ist eine Messung oder einheitliche Bewertung beider Parameter immer noch nicht möglich.

Die Ergebnisse zahlreicher Untersuchungen im Bezug auf die Nutzung verschiedener visueller Displays und der Freiheitsgrade, Sichtfeld und anderer Faktoren wie die Cybersickness u.ä. wurden, wie in Tabelle 2-1, dargestellt, verglichen. Aus der Übersicht der Forschungsergebnisse ergibt sich, dass die Freiheitsgrade und Anwendungsbereiche bei immersiven Systemen wie Surround-Displays und Head-Mounted-Display zunehmen. Damit einhergehend steigt auch die Gefahr des Eintretens von Cybersickness und teilweise die Kosten. Dem gegenüber stehen allerdings die größere Immersion und Präsenz, welche nachweislich Motivation, Verständnis und die Schnelligkeit der Aufgabenbewältigung steigern.

Tabelle 2-1: Vergleich der verschiedenen visuellen Displayarten
(Eigene Darstellung in Anlehnung an [50], [67], [151], [275], [289] und Tabelle A-1)

Parameter	World-Fixed-Display		On-Body-Display	
	Fishtank-Display	Surround-Display	HMD	HHD
	<i>z. B. Monitor</i>	<i>z. B. CAVE</i>	<i>z. B. Headset</i>	<i>z. B. Smartphone</i>
Freiheitsgrade	-	++	++	+
Anwendungsbereich	-	±	++	±
Sichtfeld	-	++	++	-
Immersion	-	+	++	-
Präsenz	±	++	+ ^(*)	±
Cybersickness	+	-	-- ^(*)	±
Toleranz Latenz	±	+	-	-
Nutzungsdauer	++	++	± ^(*)	±
Platzverbrauch	++	--	-	++
Kollaboration	+	++	+	±
Auflösung	++	++	±	+
Kosten	+	--	-	±

mit: (*) := nicht eindeutig nachgewiesen → Erkenntnisse beruhen auf alten Hardwarekomponenten

++ := sehr positive Wertung

+ := positive Wertung

± := neutrale Wertung

- := negative Wertung

-- := sehr negative Wertung

3 Analyse der Digitalen Realität und der Einsatz in den digitalen Ingenieurmethoden

„Digital ist real.“ - Georg-Wilhelm Exler

In diesem Kapitel werden die Techniken und der Anwendungsbereich des hier geschaffenen Begriffs Digitale Realität dargelegt und bestehende Technologien wie 2D, 3D, VR, AR und Mixed-Reality eingeordnet. Es werden wesentliche Begriffe im Bereich der Displaytechnologie sowie Parameter zur Messung und zum Vergleich unterschiedlicher Systeme wie z. B. Sichtfeld, Anwendungsbereich, Freiheitsgrade definiert bzw. eingeführt und erklärt. Anschließend werden im Bereich der Ingenieurwissenschaften Untersuchungsergebnisse, Anwendungsfelder und Applikationen aufgezeigt und im Kontext der Digitalen Realität aufgezählt. Es wird der Einsatz der Technologien diskutiert und anhand bisheriger Forschungsergebnisse faktisch belegt.

3.1 Der Begriff und die Technologien der Digitalen Realität

In dem bisherigen Kapitel wurde gezeigt, wie die menschliche Wahrnehmung funktioniert, welche Möglichkeiten der Interaktion es zwischen Mensch und Maschine gibt und wie Anwendungen zu einem immersiven Erlebnis gestaltet werden können. Nun werden die Technologien, Methoden und Hardware-systeme betrachtet, die für diese Anwendungen genutzt werden können. Dabei soll der neue Oberbegriff Digitale Realität eingeführt und erläutert werden. Existierende Technologien sollen diesem untergeordnet und in Beziehung gesetzt werden. Innerhalb dieses Kapitels werden die einzelnen Methoden kurz erläutert und neben einer geschichtlichen Einordnung voneinander abgegrenzt (siehe Abbildung 3-1). In Abbildung 3-1 ist die zeitliche Entwicklung beginnend mit der ersten Fotoaufnahme 1839 und damit dem Start der Digitalen Realität aufgetragen. Es wird deutlich, dass die Entwicklungen in den letzten Jahren im Bereich der künstlichen Realität und damit der Digitalen Realität rasant zugenommen haben. Liegen zwischen der ersten Idee vom Head-Mounted-Display im Jahre 1916 bis zur ersten Entwicklung 1968 noch 52 Jahre, so werden jetzt jährlich neue Arten implementiert. Die richtige Zuordnung in die Geschichte aber auch die Beziehung zwischen den Technologien sollen aufgezeigt werden, da einige Begriffe wie „Virtuelle Realität“ meist basierend auf der zeitlichen Entwicklung heutzutage falsch und damit verwirrend genutzt werden.

Daneben werden innerhalb dieses Kapitels die Grundbegriffe der Freiheitsgrade (DOF), Anwendungsbereich (FOR) und Sichtfeld (FOV) erläutert und zum Abschluss die Vor- und Nachteile aller visuellen Displays und Systeme kurz und übersichtlich aufgezeigt.

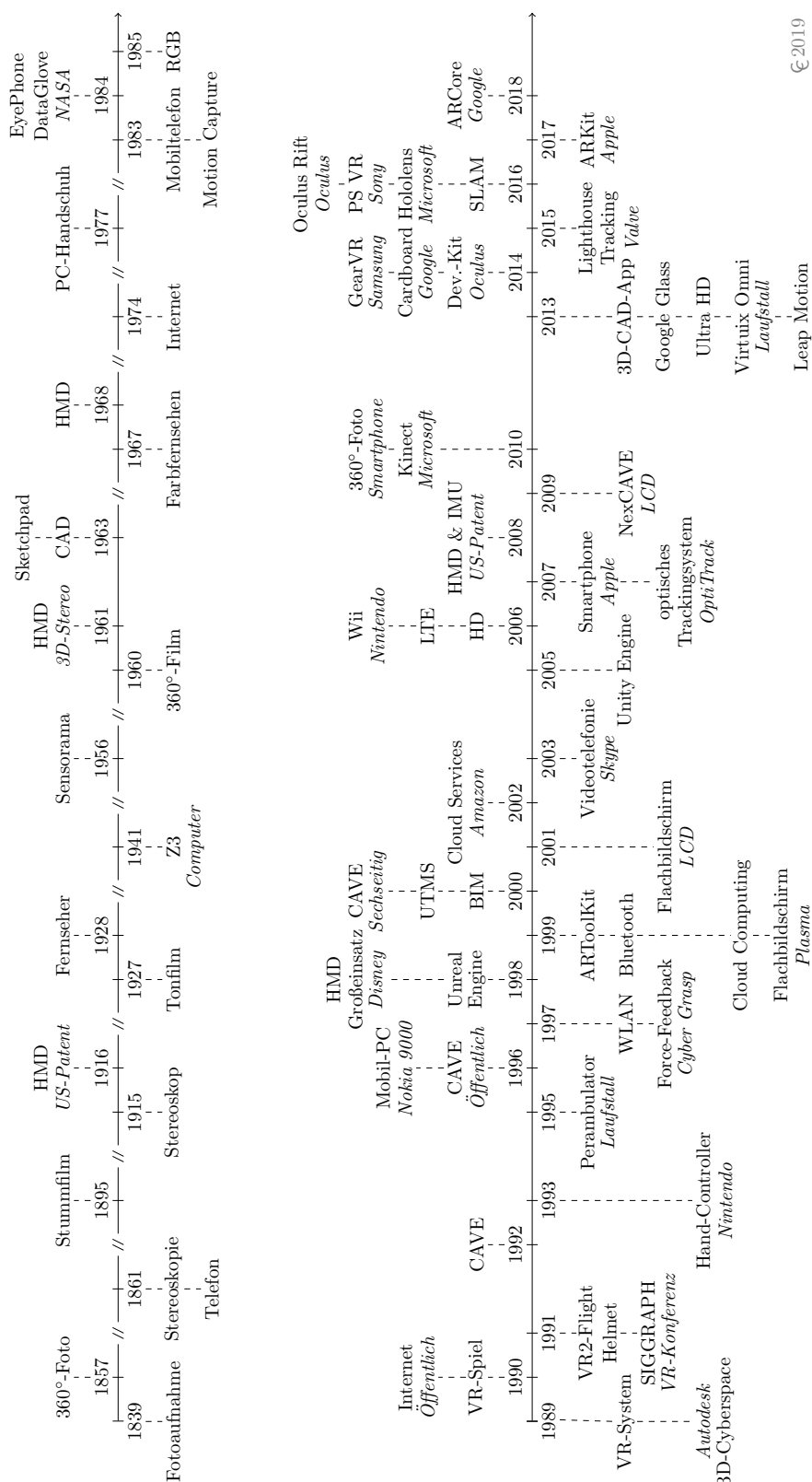


Abbildung 3-1: Meilensteine der Digitalen Realität

(Eigene Darstellung in Anlehnung an [21], [23], [30], [33], [100], [129], [134], [137], [145], [157], [259], [261], [275], [334], [343], [361])

3.1.1 Definition der Digitalen Realität

Seit Erfindung der ersten Rechenmaschine, gewannen Berechnungen und Simulationen über künstliche und virtuelle Methoden immer mehr an Interesse. Die heutige Ingenieurwissenschaft ist ohne die Visualisierung in den verschiedensten CAD-Systemen nicht mehr vorstellbar. Die Methoden und Nutzungsformen innerhalb von Computeranwendungen sind weit hin anerkannt und einem stetigen Wandel, Verbesserungen und Neugestaltungen unterlegen. Computeranwendungen oder auch -applikationen sind Synonyme für einen Oberbegriff der Informatik. Es handelt sich dabei um ein Softwaresystem, welches rechnergestützt Aufgaben und Problemlösungen durchführt [114], [170]. Mit dem Voranschreiten der technologischen Möglichkeiten und der Erweiterung der Human-Computer Interaction werden immer mehr Sinne mit künstlichen Impulsen gereizt und die menschliche Interaktion zur Eingabe genutzt. Bestrebung ist es, der natürlichen Realität immer näher zu kommen. Innerhalb dieser Entwicklung haben sich über die letzten Jahrzehnte eine Vielzahl an Lösungen entwickelt und ist dem Fortschritt sicher noch kein Ende gesetzt. Aufgrund dessen wird im Rahmen dieser Arbeit der Begriff der Digitalen Realität eingeführt. Da eine beliebige Kombination, der im folgenden beschriebenen Technologien und Systeme, möglich ist, werden alle computergestützten Anwendungen zur Beschreibung einer virtuellen Realität bzw. in einer virtuellen Umgebung in beliebiger Form als Digitale Realität zusammengefasst (siehe Abbildung 3-2). Digitale Realität umfasst somit alle computergestützten Systeme, die es sich zur Aufgabe machen, die natürliche Realität teilweise oder gänzlich nachzuempfinden, zu erweitern oder eine Kombination aus digitaler und natürlicher Realität zu sein.

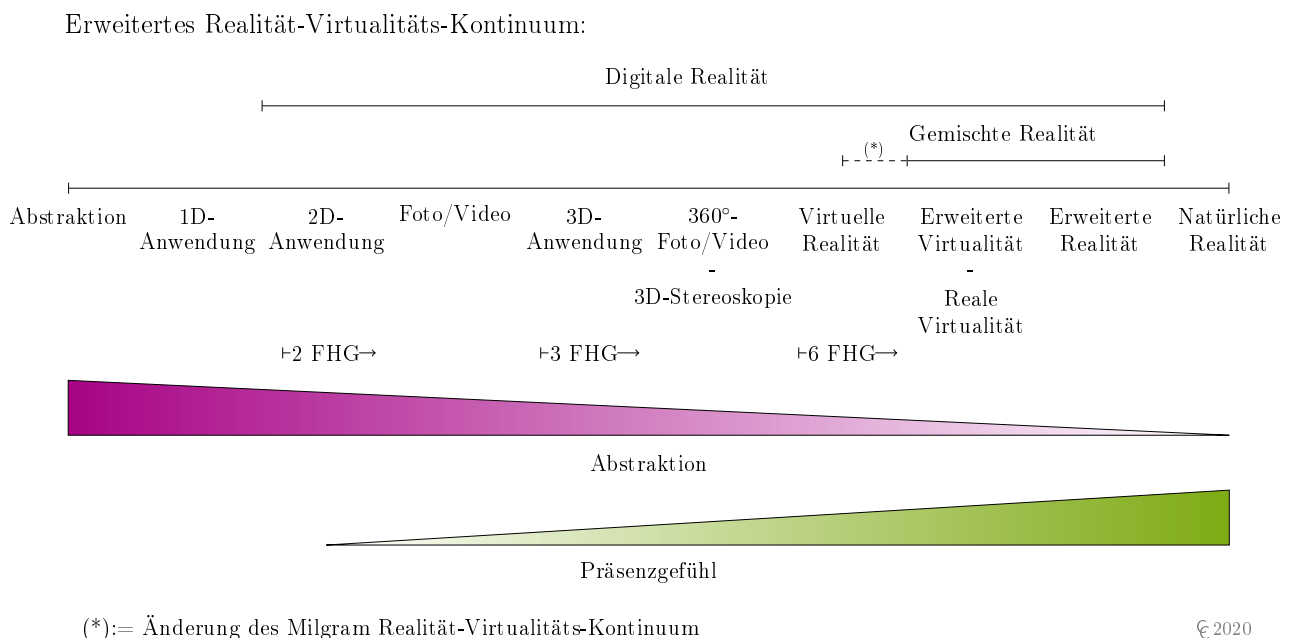


Abbildung 3-2: Erweitertes Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum mittels Digitaler Realität
(Eigene Darstellung in Anlehnung an [52], [151], [209])

Bei der Entwicklung und Einordnung der verschiedenen Technologien unter dem Begriff Digitale Realität wurde auf das anerkannte Milgram's Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum [209] von 1995 zurückgegriffen.

Milgram et al. [209] versuchten die Beschreibungen der virtuellen Umgebung (hier VR), Augmented Reality, Mixed-Reality und Erweiterte Virtualität in den Zusammenhang zwischen Realität und Abstraktion zu bringen. Jede dieser Technologie kommt der Realität auf einer anderen Weise nahe und stehen die Entwicklung durch diese Einteilung in einer logischen Beziehung zueinander. In dieses Kontinuum wurden wie in Abbildung 3-2 zu sehen ist, fehlende Repräsentationen und Anwendungsformen wie 360°-Fotos ergänzt und die Digitale Realität eingetragen. Daneben wurde die Steigerung der Freiheitsgrade aufgetragen und damit die Steigerung des Präsenzgefühl verdeutlicht. Anders als ursprünglich Milgram et al. [209] wird der Begriff der Mixed-Reality allerdings auf die VR erweitert. Dies ist begründet, da sich genutzte virtuelle Umgebungen auf realen Punktwolken aufbauen oder in VR immer mehr natürlich reale Elemente verwendet und integriert werden. Die Änderung wurde mittels einer gestrichelten Linie in Abbildung 3-2 kenntlich gemacht. Diese Darstellung soll helfen die verschiedenen Technologien sinnvoll voneinander abzugrenzen und Unterschiede deutlicher zu erkennen. Auf die einzelnen Technologien wird nun im folgendem nach Erläuterung der Grundbegriffe eingegangen.

3.1.2 Grundbegriffe Freiheitsgrade & Anwendungsbereich

Um die Einordnung und Unterschiede zwischen verschiedenen Systemen und Technologien verstehen zu können, müssen vergleichende Parameter erläutert und verstanden sein. Diese Parameter können für nahezu alle verschiedenen Displayarten und somit Technologien bestimmt werden. Die Bestimmung für verschiedene Hardwarekomponenten wurde im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt und in den Tabellen im Anhang festgehalten (siehe Tabelle A-1, Tabelle A-2, Tabelle A-4, Tabelle A-6, Tabelle A-7 & Tabelle A-8).

i) Die Beschreibung der Freiheitsgrade - DOF

Bei den Freiheitsgraden (DOF) handelt es sich um eine Beschreibung der Bewegungsfreiheit. Abbildung 3-3 zeigt die sechs möglichen Freiheitsgrade auf. Diese werden beschrieben als Rotation und/oder Translation in den dreidimensionalen Achsen (x, y, z). Der Körper kann sich also vor und zurück, links und rechts oder hoch und runter bewegen. Ein Körper kann rollen, sich neigen oder drehen. Je nach Möglichkeiten steigt auf den Körper gesehen die Anzahl der Freiheitsgrade. Die Komplexität steigt an, wenn das Objekt nicht wie in dem abgebildeten Beispiel aus einem massiven Körper besteht, sondern eine Summe aus beweglichen Kleinkörpern ist. In diesem Fall gibt es zwei unterschiedliche Ansichten der Betrachtung und Bestimmung der Freiheitsgrade. Die gängige Weise ist den Bezugspunkt auf den jeweilig zu bewertenden Körper zu legen. Es werden dann für jeden beweglichen Teilkörper die Freiheitsgrade bis maximal sechs bestimmt und für den Gesamtkörper aufsummiert. So kommt es, dass eine Tastatur abhängig des Aufbaus circa 101 Freiheitsgrade besitzt, da jede Taste eine Translation über die z-Achse ermöglicht [275]. Ein gewöhnlicher Joystick besitzt zwei Freiheitsgrade mit Rotation um die z- und x-Achse und bei Erweiterung als Tastendruck drei Freiheitsgrade, da die Translation über die z-Achse genutzt werden kann [275].

Eine andere hier vorgeschlagene Betrachtungsweise wäre den Bezugspunkt auf den Menschen zu legen und von diesem ausgehend die Freiheitsgrade der jeweiligen Hardwarekomponente zu bestimmen. Im

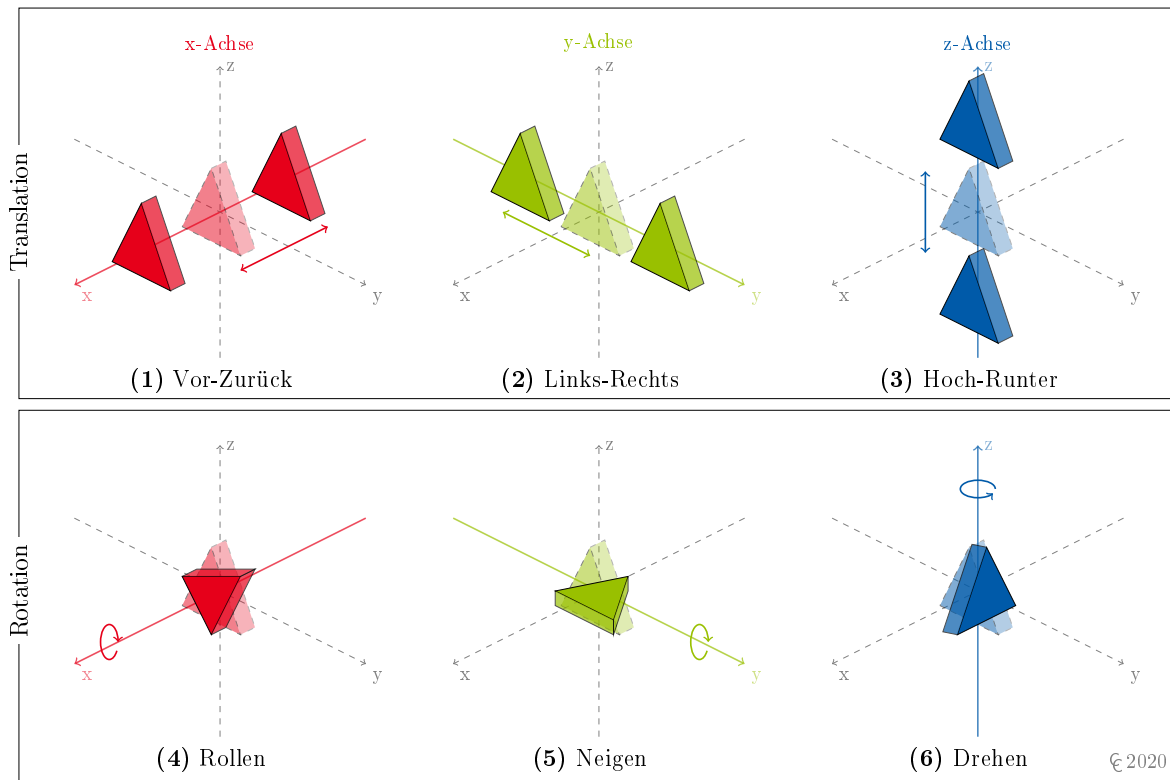


Abbildung 3-3: Erläuterung der sechs Freiheitsgrade im dreidimensionalen Raum

Anbetracht dessen, dass es darum geht, die natürliche Bewegung des Menschen nachzuempfinden, sollte die Bewertung auch als solche vom Menschen ausgehen. Die Freiheitsgrade ergeben sich in diesem Fall über die möglichen Freiheitsgrade, die der Mensch mit der Hardware durchführen kann. Bei einer Tastatur wären dies dann nicht 101 Freiheitsgrade, sondern lediglich zehn Freiheitsgrade, da eine Tastatur zehn Fingern ermöglicht über die z-Achse eine Translation durchzuführen. Bei Betrachtung über den Ursprung Menschen, stellt sich die Frage wie viele Freiheitsgrade der Mensch besitzt, weshalb dies bestimmt und in Abbildung 3-4 aufgezeigt wurde.

Zur Bestimmung der Freiheitsgrade des Menschen müssen alle beweglichen Körperteile einzeln betrachtet und zum Teil die Kombination aus diesen berücksichtigt werden. Im menschlichen Körper sind alle beweglichen Körperteile über Gelenke verbunden. Verschiedene Gelenkarten ermöglichen unterschiedliche Freiheitsgrade [202]. Das Scharniergelenk, welches z. B. zwischen den Fingerknochen vorkommt, besitzt einen Freiheitsgrad durch die Rotation in der y-Achse. Das Eigelenk ermöglicht zwei Freiheitsgrade durch eine Rotation in x- und y-Achsen. Dies taucht zum Beispiel im Handgelenk auf. Das Sattelgelenk - vorhanden im Daumen - ermöglicht zwei Freiheitsgrade durch die Rotation in x- und y-Achse. Das Kugelgelenk, wie es in der Schulter und im Hüftgelenk Anwendung findet, besitzt drei Freiheitsgrade durch die Rotation in allen Achsen. Abschließend das Drehgelenk wie bei Elle und Speiche ermöglicht eine Rotation in der z-Achse. In der Abbildung 3-4 wurden zum Zweck der besseren Übersicht teilweise Kombinationen verschiedener Gelenke wie beim Handgelenk direkt an einem Koordinatensystem aufgetragen. Die Kombination in Händen und Füßen wurde zur Verdeutlichung und die bestimmenden Gelenke über Strichpunktlinien miteinander verbunden.

Durch diese Bestimmung der Freiheitsgrade ergibt sich für jede Hand 28 Rotations- und 3 Translations-

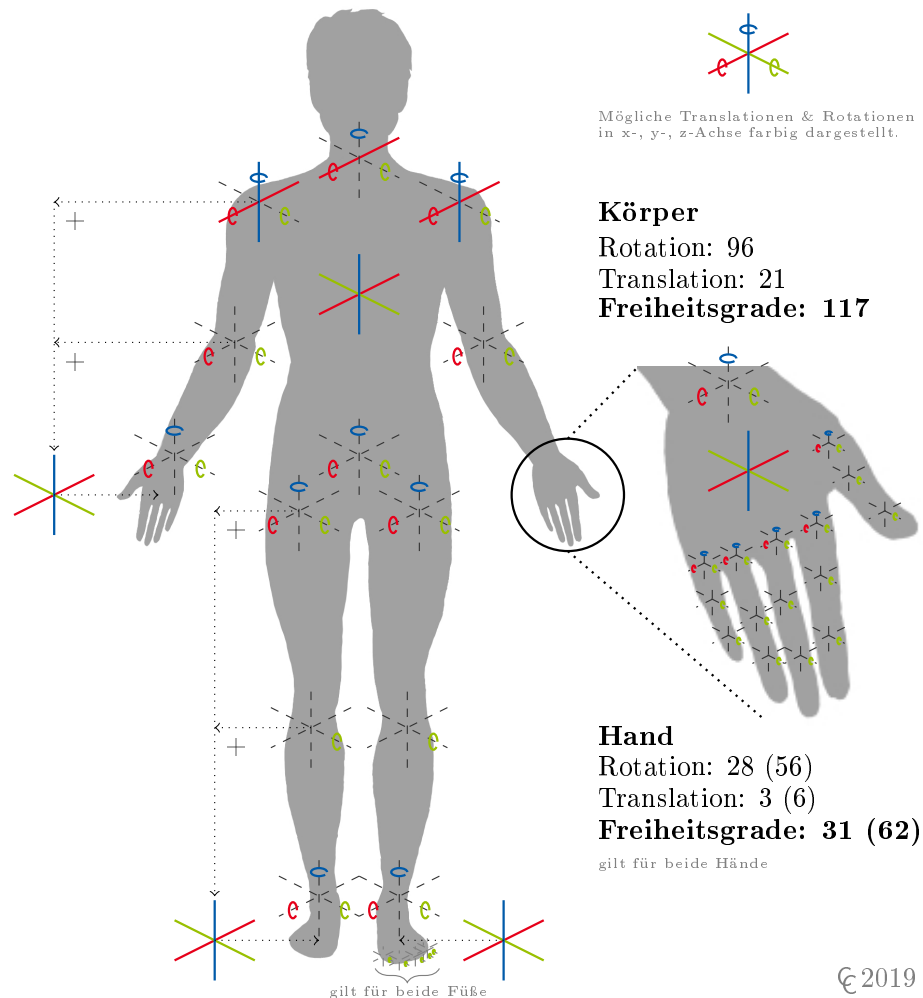


Abbildung 3-4: Freiheitsgrade des Menschen

möglichkeiten. Für beide Hände zusammen ergeben sich somit 62 Freiheitsgrade. Dies widerspricht der Aussage von Sherman und Craig [275], die insgesamt auf 44 Freiheitsgrade kommen. Dies kommt daher, dass sie nicht die vollen Bewegungsmöglichkeiten in Ihre Betrachtung einbeziehen, sondern nur die zu ihrem Zeitpunkt aktuellen maximalen Möglichkeiten über Abbildung in Hardwarekomponenten aufgetragen haben. Im gesamten menschlichen Körper handelt es sich um 96 Rotationen und 21 Translationen, was 117 Freiheitsgraden entspricht.

ii) Die Beschreibung des Anwendungsbereichs - FOR

Neben den Bewegungen abgebildet in den Freiheitsgraden, ist der Parameter Anwendungsbereich (FOR) am wichtigsten. Der englisch bezeichnete field of regards lässt sich frei als Anwendungsbereich, Geltungsbereich oder Betreuungsbereich übersetzen. Sherman und Craig [275] beschreiben ihn als Raummenge, welche den Anwendenden umgibt und mit virtuellen Inhalten verbunden ist. Dieser Parameter spiegelt wider, in welcher Größe und in welchem Bereich das System z. B. das Head-Mounted-Display eingesetzt werden kann. Dieser Parameter findet in der Fachliteratur wenig Beachtung und wird nur ab und zu bei Untersuchungen mit angegeben. Dies mag daran liegen, dass eine genaue Bestimmung schwierig

ist und es keinen einheitlichen Standard gibt. Ebenfalls stellt sich die Frage der Dimension des Anwendungsbereichs. Die Freiheitsgrade sind dimensionslos und der Anwendungsbereich hat keine festgelegte Dimension. Manchmal wird dieser als Grad oder auch in Prozent angegeben. In dieser Arbeit wird die Einheit Prozent bevorzugt und eingesetzt, da sie die Vergleichbarkeit verschiedener Displays und Systeme ermöglicht. Auch wird der Vorschlag unterbreitet den Anwendungsbereich basierend auf den Menschen zu definieren und somit anzugeben, wie viel Prozent von der natürlichen Interaktion oder Bewegungsfreiheit durch das Hardwaresystem ermöglicht wird (siehe Formel 3.1).

$$\text{FOR} = \frac{\alpha_{\text{künstliche Realität}}}{\alpha_{\text{natürliche Realität}}} * 100 \quad (3.1)$$

mit: Maßeinheit := %

α := Nutzungsbereich

Bei dieser Betrachtungsweise müssen für jeden Displaytyp Definitionen zum natürlichen Abbildungsbereich getroffen werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde diese Definition für die verschiedenen Wahrnehmungsarten, die in Kapitel 2.1 erläutert wurden, festgelegt und damit alle Displayarten bestimmt. Eine Erläuterung zur Umsetzung findet sich in Kapitel 4.1.

Eine spezielle Sonderform des Anwendungsbereichs ist das Sichtfeld. Das Sichtfeld (engl. Field of View) gilt nur für visuelle Displays (siehe Tabelle A-1) und wird meistens nur für den horizontalen Sehwinkel angeben. Dieser liegt beim Menschen im Natürlichen bei circa 180-200°. Allerdings spiegelt das Sichtfeld nicht den vollständigen Anwendungsbereich wider. Es fehlt die vertikale Sichtweite. Das Sichtfeld kann für visuelle Displays betrachtet und damit der Umfang der technischen Möglichkeit bewertet werden. Für eine CAVE wird dabei meist ein volles Sichtfeld angesetzt [275] und Head-Mounted-Display haben einen größeren Sichtfeld als traditionelle Bildschirmmonitore.

Mit Hilfe der Parameter des DOF und FOR können die einzelnen Displays und auch Technologien verglichen werden. Im Weiteren nun die einzelnen Anwendungstechnologien der Digitalen Realität im Kontext der Ingenieurwissenschaften.

3.1.3 2D-Anwendungen

Eine rechnergestützte Zweidimensionalität (2D)-Anwendung im Kontext der Ingenieurwissenschaften beschreibt eine Applikation mit zwei Dimensionen. Es handelt sich um ein planares Programm mit Punktinformationen wie x- und y-Koordinaten oder Informationen gebunden an einen Ursprung. Eine räumliche Beschreibung ist nur beschränkt möglich. Nahezu alle Computeranwendungen sind mindestens eine 2D-Anwendung (Ausnahme: Konsolenanwendungen). Es werden visuelle Displays genutzt und damit die visuelle Wahrnehmung gereizt. In einigen Fällen gibt es über Benachrichtigungs- und Signaltöne auch eine Reizung der auditiven Wahrnehmung.

2D-Anwendungen dienen der Problemlösung mithilfe von Softwaresystemen [170]. Im Ingenieurbereich können dies bereits CAD-Programme sein, da Grundrisse und Schnitte dargestellt werden können. Es werden demnach visuelle, auditive und haptische Displays eingesetzt.

3.1.4 Foto & Video

Eine spezielle Form der technischen Darstellung, welche nicht mehr als 2D aber auch noch nicht als 3D zu zählen ist, ist das Medium der Fotografie. 1839 erfunden und stetig weiterentwickelt (siehe Abbildung 3-1) ist es eine realistisch wirkende Darstellung von mehrdimensionalen Objekten und / oder Umgebungen [21], [157]. Auch wenn die Information und Datenpunkte als solche auf einem Foto nicht mehrdimensional sind, so ist dies die Interpretation im menschlichen Gehirn. Deshalb erfolgt die Anordnung zwischen 2D- und 3D-Anwendungen. Dies wird deutlicher bei der Betrachtung von dynamischen Aufnahmen - sprich Film oder Video [33], [334]. Das bewegte Bild vermittelt einen Eindruck von Informationstiefe, die über eine 2D-Anwendung hinaus geht. Eine Interaktion ist zwar weder bei Foto noch Video gegeben, da beide geführt oder festgelegt sind, aber die Möglichkeiten der Immersion durch detailreiche Reizung über visuelle und beim Film zusätzlich über die auditiven Displays sind gegeben. Im Bereich der Tätigkeit von Ingenieuren sind Fotos und Videos beliebte Medien zur Dokumentation und Aufnahmen des Ist-Zustandes oder Fortschritts. Durch spezielle Aufnahmen wie Wärmebilder können auch erweiterte Sachverhalte visualisiert werden. Somit sind Fotos und Videos günstige und einfache Hilfsmittel zur Aufnahme von Daten und Visualisierung.

3.1.5 3D-Anwendungen

3D-Anwendungen sind Applikationen, die zusätzlich zu den Informationen der x- und y-Achse auch noch eine dritte, die z-Achse, unterstützen. Der Inhalt des Programms ist nicht mehr planar und kann virtuelle Räume bilden. Innerhalb von 3D-Anwendungen werden virtuelle Umgebung geschaffen bzw. genutzt zur Repräsentation der künstlichen Realität. Dadurch, dass diese virtuelle Umgebungen sehr realistisch wirken können, wurde bereits vor Jahrzehnten für diese der Begriff der virtuellen Realität verwendet. Heutzutage hat dieser Begriff eine andere Bedeutung und sollte nicht mehr für 3D-Anwendungen und virtuelle Umgebungen bzw. immersive virtuelle Umgebungen genutzt werden. Zur Darstellung der virtuellen Umgebung werden visuelle Displays und in einigen Fällen auditive Displays genutzt, um Signal- und Benachrichtigungstöne wiedergeben zu können. 2D- und 3D-Anwendungen sind die weitest verbreiteten Applikationen und Medien im Tätigkeitsfeld für Ingenieure und Ingenieurinnen. Richards und Taylor [247] haben beide Dimensionen in der Lehre untersucht und festgestellt, dass in Zukunft auch die 3D-Anwendung aufgrund komplexer Interaktionen nicht ausreicht. Aktuell werden 3D-Anwendungen hauptsächlich am Computer durchgeführt und mit Maus und Tastatur interagiert. Im Kontext der Ingenieuranwendung gilt dies für CAD-, Building Information Model (BIM)- oder Geoinformationssystem (GIS)-Anwendungen. Aber auch komplexe Berechnungen wie für z. B. die Statik können so räumlich ermittelt werden.

3.1.6 360°- Foto & Video und Stereoskopie

Die 1861 entwickelte Stereoskopie wertet 2D-Abbildungen zu einer räumlichen Darstellung auf [261]. Hierbei werden identische Abbildungen versetzt voneinander angeordnet und jeweils für ein Auge visualisiert. Das menschliche Auge nimmt jeweils im rechten und linken Auge das jeweilig rechte oder

linke Bild war und durch die Überschneidung wird im Gehirn ein 3D-Raum berechnet. So können flache ein- bis zweidimensionale Informationen zu räumlichen Abbildungen werden. Dieser Effekt wird bei der Nutzung von Shutter-Brillen im 3D-Kino oder den Rot-Grün-Brillen verwendet. Bereits 1956 setzte Heilig [136] diese Technologie in seinem damals hochmodernen Sensorama ein. Dabei wurden Objekte und Welten stereoskopisch visualisiert, während die Nutzenden über gleichzeitig zugeführte Luftströme, Duftstoffe und Fühlen von Texturen einem immersiven Erlebnis ausgesetzt wurden. Den größten Siegeszug allerdings erhielt die Stereoskopie mit der Entwicklung der Head-Mounted-Displays 1968 und der jetzigen VR.

Diese Technik wird unter anderem auch im Medium der 360°-Fotos oder Videos genutzt. Es wurde bereits in der Antike damit begonnen mit Panoramabildern - sprich einem horizontalen Schnitt mit maximal 360°-Umgebungen festzuhalten. 1843 reichte Joseph Puchberger ein Patent für eine Panoramakamera ein [100]. Heute werden Panoramabilder softwareseitig durch die Verschneidung zahlreicher Einzelbilder erzeugt. Um ein wirkliches 360°-Bild zu erzeugen, ist allerdings nicht nur das horizontale Sichtfeld, sondern auch das vertikale aufzunehmen. Zur Erfassung der 360°-Fotos gibt es seit dem 21. Jahrhundert spezielle Kameras. Ein 360°-Foto ist somit eine Momentaufnahme, welche sich kugelförmig um den Betrachtenden legt. Durch die Nutzung von Hardware z.B. Computermouse, Inertialsensoren Smartphone, u.ä. kann das Bild rotiert werden. Mit Hilfe von Stereoskopie z. B. im Cardboard kann auch ein räumlicher Effekt entstehen. Auch wenn dieser Effekt durch die kugelförmige Projektion und der realistischen Darstellung begünstigt wird und sich Menschen leichter tun, dies als solche zu interpretieren, liegen dem Computer nur 2D-Informationen vor. Die Interpretation und Deutung liegen also in der subjektiven Wahrnehmung des Anwendenden.

Werden die 360°-Bilder nun auch noch dynamisch erfasst, können diese als 360°-Film betrachtet werden. Diese Filme ermöglichen dem Anwendenden den Fokus selbst zu bestimmen. Durch Drehungen des Drehwinkels beispielsweise mit dem Kopf, welche auf den Film oder das Foto übertragen werden können, wird dieser interaktiv [33]. Die nutzende Person hat mehr Freiheiten und ist nicht mehr vollständig der Führung durch das Medium ausgesetzt. Sherman und Craig [275] verwendet hierfür auch den Begriff der Cinematic-VR (dt. film-basierte VR). Dies entspricht einem Film, der auf einer sphärischen Leinwand präsentiert wird und dem Nutzenden ermöglicht den Bereich zu entscheiden, der betrachtet werden kann. Dieser Begriff kann allerdings irreführend sein, da hier ebenfalls dem Computer außer der Bildinformationen keine Daten zur gezeigten Umgebung u.ä. vorliegt. Dies bedeutet es handelt sich um eine reine Visualisierung und die Interpretation liegt beim Nutzenden. Es werden auch ähnlich wie bei dem ursprünglichen Fotos und Videos visuelle und beim 360°-Film auch auditive Displays genutzt. Was das Erlebnis so natürlich wirken lässt ist die geringe Bewegungsinteraktion und das Raumgefühl.

3.1.7 Virtuelle Realität

Der Begriff der virtuellen Realität trat bereits in den Anfängen der Entwicklung von virtuellen Umgebungen auf und wird heute noch fälschlicherweise für eigentliche 3D-Umgebungen verwendet. Grund dafür ist der bereits real wirkende Eindruck und die Vermarktung von dreidimensionalen Welten. Allerdings fehlen diesen virtuellen Modellen die Immersion, das Gefühl der Präsenz und die natürliche Interaktion in Form intuitiver und natürlicher Bewegungen. Zunehmend wird der Begriff auch für den Einsatz von 360°-Fotos und Filmen genutzt, aber auch dies ist nicht richtig. Das liegt daran, dass diese Abbildung

keine eigene „[...] künstliche Umgebung [enthält] , die mittels den Computer bereitgestellte sensorischen Reizen [...] erlebt wird und in der die eigene Handlungen teilweise [...]“ [204]¹ bestimmt werden kann. VR dagegen beschreibt Xie et al. [348] als „[...] ein leistungsstarkes Werkzeug, dass die Art und Weise revolutioniert, wie Menschen wahrnehmen.“². Dafür sind im Medium VR laut Burdea [46], Rebelo et al. [243] und Sherman und Craig [275] Immersion, Interaktion, Präsenz und Vorstellungskraft des Nutzens nötig. Es ergibt sich die folgende eigens zusammengestellte Definition für das Medium und die Technologie Virtuelle Realität.

Virtuelle Realität ist ein Medium zur Reizung mehrerer Sinne und „[...] eine computer-generierte interaktive Umgebung [(≙ virtuelle Umgebung) zur Schaffung einer künstlichen Realität], die in Echtzeit berechnet und dargestellt wird. [...] VR ermöglicht das freie Explorieren sowie die Interaktion mit virtuellen Gegenständen und Personen.“ [144]. VR schafft durch die Nutzung mehrere Sinne und Wahrnehmungsformen eine Immersion und das Gefühl von Präsenz, wodurch für den Anwendenden eine künstliche Realität entsteht.

„Die Präsentation [...] der VR] kann entweder durch klassische Monitore, durch Projektionstechniken [...] z.B. innerhalb einer CAVE] oder durch [...] Head-Mounted-Display] erfolgen“ [144]. Es werden wie bei den vorherigen Technologien nicht nur visuelle und auditive Displays verwendet, sondern können durch entsprechende Hardware auch haptische, olfaktorische und gustatorische Displays genutzt werden (siehe Tabelle A-4, Tabelle A-6, Tabelle A-7). Bereits 1968 gab es mit der Anwendung von Sutherland [297] das erste noch sehr unflexible Head-Mounted-Display und somit den Startschuss für die heutigen Head-Mounted-Displays. 1992 wurde die erste CAVE vorgestellt und in den darauffolgenden Jahren auch kostengünstiger. Doch einen richtigen Schwung bekam das Thema erst mit der kostengünstigen Head-Mounted-Displays, welche nicht nur für Forschung und Entwicklung, sondern den breiten Massenmarkt umgesetzt wurden. 2016 war die Rechenleistung der CPU und GPU in den verbreiteten Computern und Laptops ausreichend, dass Tracking über optische und elektromagnetische Verfahren klein kompakt und dabei genau genug, um Head-Mounted-Displays zu realisieren. Seit 2016 werden jedes Jahr neue Entwicklungen im Bereich der VR veröffentlicht. Diese betreffen nicht nur die visuelle Wahrnehmung, sondern vermehrt auch die Interaktionsmöglichkeiten über weitere Eingabegeräte und die Bespielung weiterer Sinne.

Bei dieser großen Vielfalt und verschiedenster Lösungsmöglichkeiten zur Realisierung von VR wird in der Fachliteratur immer wieder nach einer Kategorisierung verschiedener Arten gesucht. Wang et al. [340] unterteilt die untersuchten Ingenieur Anwendungen in Desktop-basierte VR, immersive VR, 3D-spielbasierte VR und BIM-aktivierende VR. Wang et al. [340] vermischt bei dieser Einteilung eine Kategorisierung nach Displaytypen und Ingenieur-spezifischer Methodik. Rebelo et al. [243] schlägt die Einteilung von Voll-Immersion VR, Semi-Immersion VR und Nicht-Immersion VR vor. Dabei reduziert er die Immersion auf die visuelle Wahrnehmung und verwendet die Kategorisierung anhand von verwendeten visuellen Displays. Ein Fishtank-Display wird hier zu einer Nicht-Immersion VR und eine

¹ Zitat ist frei aus dem Englischen übersetzt nach [204]. Original lautet: „[...] An artificial environment which is experienced through sensory stimuli (such as sights and sounds) provided by a computer and in which one's actions partially determine what happens in the environment.“

² Zitat ist frei aus dem Englischen übersetzt nach [348]. Original lautet: „VR is a powerful tool that is revolutionizing the way people perceive knowledge.“

Head-Mounted-Display zur Voll-Immersiven VR. Wie die Recherchen in den Kapiteln 2.1, 2.2 und 2.3 und hier die Definition von VR beinhaltet, ist diese Betrachtung und Kategorisierung bzw. Reduktion auf die visuelle Wahrnehmung sehr einseitig und nicht vollumfänglich. Da die Wichtigkeit der Immersion, Interaktion, Präsenz und die Existenz der virtuellen Umgebung in einer VR gleichbedeutend ist, sollte auf eine Kategorisierung nach einem der Parameter verzichtet werden. Ein Lösungsvorschlag wird in dem Konzept Kapitel 4.2 vorgeschlagen.

3.1.8 Erweiterte Virtualität oder auch Reale Virtualität

In ihrem Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum schafften Milgram et al. [209] den Begriff Erweiterte Virtualität (AV) (engl. Augmented Virtuality), welcher beschreibt, dass in einer virtuellen Umgebung natürlich reale Elemente bzw. Objekte aufgenommen und verwendet werden. Dabei ist der wesentliche Bestandteil der virtuellen Umgebung allerdings künstlich und nur in einem geringeren Anteil die natürliche Realität vorhanden [151]. Chalmers und Ferko [52] verwenden synonym den Begriff Reale Virtualität, um die natürliche Realität in der virtuellen Umgebung zu betonen und bilden Anwendungsbeispiele mit der Einbindung natürlich realer Gegenstände in das Erweiterte Virtualitäts-Erlebnis. Es sind dabei keine Grenzen gesetzt, welche der in Kapitel 2.1 beschriebenen Wahrnehmungsformen und Displayarten genutzt werden. Der Anteil der virtuellen Komponenten überwiegt den Anteil der natürlich Realen.

Am IIB wurde eine VR-Anwendung zur Brandbekämpfung mittels Feuerlöscher zu einem realen Virtualitäts-Erlebnis erweitert, indem als Eingabegerät ein natürlich realer Feuerlöscher genutzt wurde [29], [92], [211]. Der Feuerlöscher entspricht damit dem realen Gewicht und der Haptik und wird gleichzeitig in der virtuellen Umgebung eingeblendet und visualisiert. Mit Hilfe von HTC Vive Trackern kann die Position im Lighthouse Trackingsystem in Echtzeit bestimmt und auf die virtuelle Repräsentation übertragen werden. Bei Betätigung des Hebels am Feuerlöscher geschieht in der natürlichen Realität nichts, in der virtuellen Umgebung wird der Feuerlöscher aktiviert und Schaum strömt aus dem vorgesehenen Schlauch³. Mit dieser Möglichkeit werden reale Objekte in die sogenannte Virtualität übernommen und die Abstraktion verringert. Der Grad der Nutzung von natürlicher Realität steigt im Vergleich zur VR.

3.1.9 Erweiterte Realität

Nimmt das Verhältnis von künstlicher und natürlicher Realität wieder einen größeren Anteil Richtung natürlicher Realität an, spricht man von Augmented Reality.

Augmented Reality (dt. Erweiterte Realität) „[...] bezeichnet eine computerunterstützte Wahrnehmung bzw. Darstellung, welche die reale Welt um virtuelle Aspekte erweitert“ [197] „[...] und idealerweise wäre der menschliche Geist nicht in der Lage, zwischen computergenerierten Reizen und der realen Welt zu unterscheiden“ [151]⁴.

In AR wird also die natürliche Realität mit virtuellen Objekten und computergenerierten Inhalten erweitert [275]. Dabei kann die Darstellungsform der natürlichen Realität statisch ($\hat{=}$ Foto) oder dynamisch

³ YouTube-Video: <https://youtu.be/ftJcg91igtC> Aufgerufen am 04.02.2020.

⁴ Zitat frei aus dem Englischen übersetzt nach [151]. Original lautet: „[...] Augmented Reality (AR) adds cues onto the already existing real world, and ideally the human mind would not be able to distinguish between computer-generated stimuli and the real world.“

sein. Die Qualität und das Erlebnis sind aber bei dynamischen Formen wesentlich höher. Die natürliche Realität wird meist über Hand-Held-Displays wie Smartphones, Tablets oder Head-Mounted-Displays wie AR-Brillen eingefangen und über die zur Verfügung gestellte Rechenleistung mit den virtuellen Inhalten erweitert.

In der ursprünglichen Form von AR, wie es 1999 mit dem ARToolKit als open-source veröffentlicht wurde, basierte das Grundprinzip auf Markern. Marker sind eindeutig durch den Computer im Kamerabild identifizierbare Erkennungsmerkmale beispielsweise QR-Codes. Wird ein solcher Marker durch den Computer z. B. Hand-Held-Display detektiert, wird das abgespeicherte virtuelle Objekt darauf platziert und zusätzlich zum Kamerabild visualisiert. Die Anfertigung und Platzierung dieser Marker kann unter Umständen sehr aufwendig sein. Deshalb haben die Softwarefirmen Google und Apple mit Tiefensensoren und den Informationen der IMU wie das Gyroskop, der Neigungssensor, der Beschleunigungssensor, u.ä. der Hand-Held-Displays versucht die AR-Technologie komfortabler zu gestalten. Ihre Lösungen wurden 2017 und 2018 als ARKit von Apple und ARCore von Google veröffentlicht und wird seitdem stetig weiterentwickelt. Beide setzen eine markerlose Lösung von AR um und nutzen Algorithmen und sensorbasierte Informationen zur optimalen Platzierung. Mit Hilfe von mobilen Geräten mit integrierten Kameras und IMU können mit dem sogenannten Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)-Algorithmus und Visual Odometry (VIO) genaue Positionsbestimmungen und räumliche Maße berechnet werden [324]. Durch die IMU kennt das mobile Endgerät seine Position im Raum und durch die Aufnahme von Bildern und Erkennung von Zusammenhängen bzw. Änderungen zur vorherigen Aufnahme (=VIO) sowie der Berechnung von Punktwolken anhand des Kamerabildes und dem Bewegungsprofils (=SLAM-Algorithmus) können virtuelle Gegenstände maßstabsgetreu und mit real wirkenden Lichtverhältnissen in das Kamerabild projiziert werden [356]. Der Nachteil der markerlosen Variante ist, dass die Position der virtuellen Gegenstände vorerst nicht festgelegt sind und zu Beginn des Programmstarts mühevoll eingearbeitet werden müssen. Ähnlich wie bei der Marker-Variante bleiben diese dann bis zu einem definierten Zeitpunkt bestehen.

Im Falle von AR wird die natürliche Realität in ihrer Abbildung und Sinnesreizung verwendet und virtuell um visuelle und auditive Reize ergänzt. Eine Bestrebung auch weitere Sinne in AR künstlich zu Reizen sind nicht bekannt, sind aber durch einige Hardwarekomponenten technologisch bereits möglich. Dies wären z. B. das Ausströmen von Duftstoffen zusätzlich zur Visualisierung des Objekts. Damit würde die Technologie der AR innerhalb der Digitalen Realität der natürlichen Realität am nächsten kommen.

3.1.10 Mixed-Reality

Die Mixed-Reality (dt. Gemischte Realität) oder auch selten X-Reality genannt ist eigentlich keine eigene Technologie oder Medienform wie die zuvor beschriebenen. Vielmehr ist es der Versuch, die Technologien von AR über Erweiterte Virtualität bis hin zu VR zusammenzufassen bzw. zu kombinieren. Mixed-Reality ist also eine Mischform aus den bereits beschriebenen Technologien und ist als solche auch in das Kontinuum von Milgram et al. [209] in Abbildung 3-2 eingetragen. Dieser Begriff ist zu verwenden, wenn Anwendungen nicht nur eine der Technologien, sondern mehrere umsetzen. Dies kann beispielsweise sein, wenn eine Anwendung auf Baustellen virtuelle Elemente einblendet und gleichzeitig Punktwolken des Ist-Zustandes aufnimmt, welche in VR nochmals ortsunabhängig betrachtet werden können.

3.1.11 Zusammenfassung der Digitalen Realität

Innerhalb dieses Kapitels wurden die traditionellen Medien und Technologieformen wie 2D, Fotografie und 3D mit den gerade erforschten und für den breiten Massenmarkt entwickelten Techniken wie VR und AR in Zusammenhang gebracht. Dies wurde in Abbildung 3-2 visualisiert und anhand der Auftragung von natürlicher Realität bis zur vollständigen Abstraktion verständlich eingeordnet. Hieraus entstand das erweiterte Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum, welches für die weitere Entwicklung dieser Arbeit grundlegend ist. Es wurde gezeigt, wie die Abstraktion mit den verwendeten Displays und somit den unterschiedlichen Sinneszreizungen zusammenhängt. Die Immersion steigt durch die Anzahl der bespielten Wahrnehmungsarten. Die Technik hinter jeder Form wurde kurz erläutert und von den anderen deutlich abgegrenzt.

Dieses Kapitel gab nun eine Übersicht über alle Medien- und Technologieformen in der Digitale Realität und erklärte diesen Begriff als Oberbegriff virtueller und computer-basierter Technologieformen innerhalb der künstlichen Realität.

3.2 Einsatz im Bereich der Ingenieurwissenschaften

In diesem Kapitel soll der Einsatz von neuen Technologien der Digitalen Realität und damit einer gesteigerten Immersion durch Bespielung der menschlichen Wahrnehmung im Kontext der Ingenieurwissenschaften beleuchtet werden. Hierfür werden die Bereiche der Ausbildung bzw. Trainings von Ingenieuren und Ingenieurinnen, der Prozess der Planung, Planausführung bzw. Bauen und den anschließenden Betrieb von Anlagen im Bau- und Umweltwesen jeweils in einem Unterkapitel betrachtet. Dabei können aufgrund der rasant wachsenden Anzahl nur auszugsweise Betrachtungen stattfinden. Wesentliche Forschungsergebnisse werden in Zusammenhang mit der Technologie und dem genutzten Displaysystem dargestellt, um Aussagen über die Zweckmäßigkeit und Mehrwert einzelner Systeme für Ingenieure und Ingenieurinnen treffen zu können.

Daneben wird kurz erläutert welche Möglichkeiten es gibt, die Software und Datenmodelle von Ingenieuren und Ingenieurinnen in Form eines Building Information Models mit den neuen Technologien VR, Erweiterte Virtualität, AR und Mixed-Reality zu verbinden. Probleme des Datenaustauschs und Lösungsvorschläge werden festgehalten und eigene Arbeiten zum Laufe des Forschungsrahmens dieser Arbeit hervorgehoben. Ebenfalls werden Eigenentwicklungen im Bereich der digitalen Ingenieurmethoden aufgezählt, erläutert und in Kontext zu bestehenden Entwicklungen gebracht. Basierend auf diesen Ergebnissen wird Sinnhaftigkeit für die Verwendung der Digitalen Realität für digitale Ingenieurmethoden diskutiert.

3.2.1 BIM in der Digitalen Realität

In der Planung, im Bau und Betrieb von Anlagen wird in den Ingenieurwissenschaften zunehmend die Methodik des Building Information Modelings genutzt. Dabei sind andere Europäische Länder mit Normen und Auflagen im Einsatz der Methodik fortschrittlicher zu den Entwicklungen in Deutschland. Hier zu Lande wurde 2015 der „Stufenplan Digitales Planen und Bauen“ durch die Bundesregierung vorgelegt. In diesem steht für BIM folgende Definition:

„Building Information Modeling bezeichnet eine kooperative Arbeitsmethodik, mit der auf der Grundlage digitaler Modelle eines Bauwerks [$\hat{=}$ BIM] die für seinen Lebenszyklus relevanten Informationen und Daten konsistent erfasst, verwaltet und in einer transparenten Kommunikation zwischen den Beteiligten ausgetauscht oder für die weitere Bearbeitung übergeben werden.“ [45]

Diese Methode beinhaltet ein mehrdimensionales Model, das sogenannte Building Information Model. Dieses BIM beinhaltet neben geometrischen 2D- und 3D-Informationen auch semantische Daten und Informationen, welche objektbasiert, algorithmisch, parametrisch u.ä. genutzt werden können. Da weder das Building Information Model noch das Building Information Modeling eine Software oder Definition zur Datenhaltung ist, sind einige Ingenieurgesellschaften (z. B. buildingSMART e.V., D-A-C-H BIM Coordination Group, BIM -Cluster, u.ä.), Hersteller und Entwickler gefordert Standards zu finden. Im Rahmen dieser Arbeit sind Standards bezüglich der Datenhaltung und der Datenformate gemeint. Aktuelle CAD-Softwaresysteme, welche BIM unterstützten wie Autodesk Revit, Nemetschek Allplan, Graphisoft Archicad oder BIMx, Solibri, u.ä., halten die Daten in einer eigenen Datenbank und exportieren diese in proprietären Datenformate. Der buildingSMART e.V. setzt sich für die Entwicklung eines offenen Datenaustauschformates - Industry Foundation Classes (IFC) - ein, welcher in der aktuellen Version 4.0 vorliegt [44]. Dieser Standard wird von den Softwareherstellern teilweise aber nicht in vollem Informationsumfang angeboten. Eine schnelle, fehlerfreie und auf wenig Schritten beruhende Übertragung von BIM zu Technologien der Digitalen Realität und Nutzung der geometrischen semantischen Informationen für eine künstliche Realität ist damit zum derzeitigen Zeitpunkt nicht möglich.

Dennoch haben sich in der Recherche mehrere Wege und Lösungen gefunden BIM in AR, Erweiterte Virtualität, VR und Mixed-Reality zu nutzen. Dabei ist der erste Lösungsansatz in keiner Weise zu empfehlen und wird in der zukünftigen Betrachtung außen vorgelassen, dennoch soll dieser hier erwähnt werden. Es handelt sich hierbei um das aufwendige Kopieren und Nachmodellieren teilweiser oder vollständiger Building Information Modelle in der Entwicklungsumgebung der Digitalen Realität-Anbindung. Der Mehraufwand und Fehleranfälligkeit machen diesen Ansatz zu aufwendig. Ein besserer und zumeist genutzter Lösungsweg ist der Export von geometrischen Informationen als FBX, DAE, GLTF oder GLT-Datei und Import in die Software der Digitalen Realität wie UnrealEngine, Unity, Game Studio, u.ä. Bei diesem Export gehen alle semantischen Informationen verloren. Bei diesem Ansatz wird meist die geometrische Hülle zur Visualisierung genutzt [5], [7], [29], [169], [174], [189], [228].

Die Softwarehersteller ihrerseits bieten z. B. mit BIMx, InsiteVR, u.ä. Lösungen an, mit der oftmals falschen Behauptung das BIM in VR zu erleben. Es handelt sich hier meist über Cardboards ($\hat{=}$ Head-Mounted-Display) zur Verfügung gestellte 360°-Visualisierungen [5]. Es fehlt die Interaktion, Bewegungen werden über einfache Eingaben mittels Joysticks oder Controllern durchgeführt. Zudem wird nur die visuelle Wahrnehmung beansprucht. Der beste Ansatz ist die direkte Nutzung der Datenbank des Building Information Models und somit das volle geometrisch und semantische Wissen in der künstlichen Realität zu nutzen. Dadurch, dass hier allerdings kein Standard vorliegt, sind aktuelle Entwicklungen und Forschungsansätze manuelle Lösung basierend auf ein spezielles CAD-System und deren Möglichkeiten mittels beispielsweise Application Programming Interface (API) auf die Datenbank zuzugreifen [159]. Diese Lösungen sind für eine CAD-Software, eine spezielle BIM-Datenbank und Entwicklungsumgebung der Digitalen Realität ausgelegt. Kieferle und Woessner [159] entwickelten sogar in Vorarbeit die Visualisierung in VR und die Schnittstelle hierfür selbst. Anschließend nutzen sie Autodesk Revit, um mit der

Revit-API auf die BIM-Daten zugreifen zu können. Dabei sind sie nicht auf eine Art der VR-Nutzung beschränkt, sondern können VR mittels CAVE und Powerwall und 3D-Visualisierung über Touchtable oder Tablet umsetzen. Der große Vorteil dieser Methode ist die Datensynchronisation und somit die geräte- und technologieübergreifende Veränderung des Building Information Models. Mit dem gleichen Ansatz setzen Hakkarainen et al. [130] und Wang et al. [339] dies für BIM und AR um.

Um eine Brücke zwischen dem reinen geometrischen Export und der manuellen Anbindung an eine BIM-Datenbank aufzubauen, gehen Bittner et al. [29] den Weg einer Kombinationslösung. Das BIM wird als geometrisches Modell in FBX, DAE oder GTLF und gleichzeitig als IFC exportiert. Die IFC-Datei wird zu einer IFCXML verlustfrei konvertiert, um damit die Maschinenlesbarkeit zu verbessern. Anschließend werden die semantischen und geometrischen Informationen basierend auf der IFCXML-Datei und der geometrischen Repräsentation automatisch verknüpft und können als solche in der Anwendung der Digitalen Realität verwendet werden. Dabei zeigten Bittner et al. [29] den Mehrwert dadurch, dass aktuell im BIM nicht vorgesehene Informationen und Elemente, wie das Wissen zur Objektinteraktion, in einer virtuellen Umgebung, basierend auf den semantischen Informationen, automatisch ergänzt werden können. Dies wurde gezeigt durch die entstehende, natürliche Interaktion beim Öffnen von beispielsweise Türen über Hand-Controller ohne jegliche manuelle Nachbearbeitung. Das Ergebnis ist eine einfache und automatische Integration von VR in den CAD-Prozess. Sie wiesen zusätzlich nach, dass es innerhalb von einem Arbeitstag möglich ist, ein BIM eines typischen Büro-Grundrisses von Grund auf aufzunehmen und in VR interaktiv und immersiv zu nutzen. Dabei war die Aufnahme und Erstellung des Building Information Models der aufwendige und manuelle Arbeitsanteil.

Auch wenn der optimale Weg vom BIM zur Anwendung der Digitalen Realität noch nicht unterstützt wird, wäre er technologisch möglich und gibt es bereits Ansätze, um eine schnelle Automation zu gewährleisten. Damit ist es möglich das mächtige Wissen eines Building Information Models und die Grundlage der zukünftigen Ingenieurarbeit in VR- oder AR-Anwendungen zu nutzen. Ein paar Anwendungsbeispiele, -umsetzungen und Ideen sind in den folgenden Abschnitten beschrieben.

3.2.2 Anwendungen im Bereich der Lehre, Ausbildung und Training für Bau- & Umweltwesen

Im Bereich der Lehre, Ausbildung und dem Training im Bau- und Umweltwesen von Ingenieuren und Ingenieurinnen finden die meisten Untersuchungen in verschiedenen Anwendungsfeldern statt und existiert die größte Anzahl an Lösungsansätzen und Entwicklungen zum Thema der neuen Technologien der Digitalen Realität. Dies liegt unter anderem daran, dass VR- und AR-Applikationen oftmals in den Bereich des **Serious Games** gezählt werden. **Serious Game** ist der Begriff für ein digitales Spiel oder das digitale Spielen, welches die Intention besitzt, den Nutzenden zu motivieren und zu „bespaßen“, während es gleichzeitig das Ziel verfolgt, einen Lernaspekt oder einen Fitnessaspekt für den Anwendenden durchzuführen [83], [263]. Die **Gameification** bezeichnet das Hinzufügen eines spielerischen Inhalts auf einen sonst unbespielten Bereich. Beim Spielen wird die intrinsische Motivation des Menschen angesprochen [263]. Im breiten Massenmarkt ist der Einsatz von VR auf der Branche der Computerspiele fokussiert. Ein entscheidender Faktor in der Nutzung von VR ist die Motivationssteigerung und die Möglichkeit auf natürliche Weise sich dem Inhalt zu nähern bzw. sich damit auseinanderzusetzen. Virvou et al. [324] zeigen in einer Studie, dass VR-Applikationen für Studierende sehr motivierend sind und Burdea [46], Wang et al. [340] und Woksepp und Olofsson [347] betonen, dass dadurch Effizienz- und Performanzsteige-

rung entstehen. Den direkten Vergleich von traditioneller theoretischer und der modernen interaktiven Wissensdarbietung für Ingenieure und Ingenieurinnen erstellen Abulrub et al. [5] und stellen fest, dass durch neue Methoden Kreativität, Innovation, Kommunikation gefördert werden. Anschließend kann das Fachwissen über längere Zeiträume abgerufen werden und die Fähigkeit, selbstständig und in Teamwork Probleme zu lösen, wird gesteigert. Sie betonen, dass Langzeitkosten verringert, Probleme mit Kauf und Wartung von Ausrüstung und Equipment gespart und der Zeitaufwand zur Vorbereitung, Aufbau, Durchführung und Abbau gesenkt werden kann. Ein weiterer Vorteil ist die drastische Risikominderung im Umgang mit Gefahrstoffen oder -situationen. Dies spiegelt die Erkenntnisse von Zhao und Lucas [360] wider, die die Lernsteigerung von aktivem Lernen in Workshops, Rollenspielen, Simulationen und Übungen z. B. in VR im Verhältnis zu passiven vergleichen.

Dieser Aussage widersprechen Buttussi und Chittaro [49], Leder et al. [176] und Richards und Taylor [247] in verschiedenen Punkten. Leder et al. [176] untersuchten im Sicherheitstraining den Wissensunterschied zwei verschiedene Gruppen. Die eine Gruppe erhielt das Wissen über Folien vorgetragen, die zweite in einer VR-Anwendung. Ein signifikanter Wissensunterschied konnte nicht festgestellt werden. Ähnlich untersuchte Buttussi und Chittaro [49] den Langzeiteffekt im Vergleich mit Fishtank-Displays und Head-Mounted-Displays. Das Wissen war nach zwei Wochen identisch, das Gefühl der Präsenz bei der Nutzung des Head-Mounted-Displays allerdings deutlich nachweisbar. Die genutzte VR-Anwendung beider Anwendungen wurde mit einer Oculus Dev-Kit durchgeführt, diese bot eine geringe Auflösung und die Bewegung wurde über Joystick und somit nicht in freier Bewegung getätigt. Es ist demnach im Vergleich zu aktuellen VR-Systemen von einer geringeren Immersion und somit auch Motivationssteigerung auszugehen. Es wird der Vorschlag unterbreitet diese Untersuchungen mit neuer Hardware zu wiederholen.

Dies bestätigt sich bei der Betrachtung von Pausch et al. [229]. Pausch et al. [229] weisen nach, dass die Geschwindigkeit zur Ortung von virtuellen Objekten und damit das Raumgefühl größer ist, wenn ein Head-Mounted-Display bzw. eine 360°-Ansicht genutzt wird. Im ähnlichen Vorgehen wie Leder et al. [176] untersuchten zuvor Katsioloudis et al. [154] die Fähigkeit zur räumlichen Vorstellung, indem sie verschiedene Gruppen mit einem natürlich realen Objekt, einer 3D-Anwendung und VR über Head-Mounted-Display das gleiche virtuelle Objekt erkunden konnten. Sie stellten fest, dass die räumliche Vorstellungskraft vergleichbar mit der Immersion steigt. In 3D ist diese somit geringer als in VR und am höchsten innerhalb der natürlichen Realität.

Das wesentliche Problem, welches auch Burdea [46] beschreibt, ist das Problem der schweren, aufwendigen und fehlerfreien Anbindung von Wissen und Inhalt an die neuen Technologien der Digitalen Realität. Dazu kommt die von Burdea [46] geforderte Umstrukturierung der Lehre, welche mit den interaktiven Methoden nicht traditionell weitergeführt werden kann. Um den Zugang der Studierenden zu ermöglichen und bereits in der Ausbildung Lösungen zu finden, beschreiben Häfner et al. [127] einen eingesetzten Kurs in der universitären Ausbildung. In diesem müssen werdende Ingenieure und Ingenieurinnen ein VR-Projekt zur immersiven Visualisierung von Ingenieurwissen umsetzen. Hierfür steht den Studierenden eine CAVE oder Powerwall zur Verfügung und es hat sich gezeigt, dass die Studierenden durch die Nutzung des neuen Mediums hoch motiviert über die Anforderungen hinaus Lösungen entwickeln. Burdea [46] stellte in einer Umfrage 2003 fest, dass 148 Universitäten weltweit mit VR arbeiten. 2008 erhöhte sich diese Zahl auf 273 [47], dennoch ist das nur ein flacher Anstieg, um die

Technik flächendeckend zu nutzen.

Dies waren Ergebnisse zu Untersuchungen und Aussagen anderer Wissenschaftler zum Einsatz der neuen Technologien der Digitalen Realität in der Lehre. Im Folgenden noch ein paar Auszüge aus bereits entwickelten Anwendungen und die Erfahrungen dazu. Ein allgemeinen Versuch einen virtuellen Raum, die Interaktion zwischen Lehrenden und Studierenden, sowie das Verhalten von Studierenden abzubilden, machten Ke et al. [156]. Sie stellten dabei heraus, dass die Darstellung von Texten und das Lesen in einer immersiv genutzten Umgebung über Head-Mounted-Displays noch nicht ausreichend ist. Grund hierfür ist die geringe Auflösung (siehe Tabelle A-1). Zur Nutzung des Gefühls von Präsenz und zum Training der Entscheidungsfähigkeit basierend auf Situationen dennoch empfehlenswert ist. Im Bereich des Sicherheitstrainings auf Baustellen erstellten Le et al. [175] eine Anwendung zur kollaborativen Exploration verschiedener Baustellenszenarien. Bisher wird das Training und die Ausbildung sehr theoretisch und mit Darstellung von Piktogrammen bzw. fotografischen Fallbeispielen durchgeführt. Le et al. [175] erstellten eine virtuelle Umgebung, welche sie als 3D-Anwendung oder AR-Applikation über ein Gerät der Hand-Held-Display zugänglich machten. So konnten Sicherheitsmängel in einer vollständig künstlichen Umgebung zeit- und ortsungebunden oder vor Ort durch virtuelle Einblendungen erkundet werden. Dabei gab es eine Lern- und gemeinschaftliche Reflexionsphase bei der die Anwendenden als Avatare kommunizieren konnten. Mit einem Test von 35 Personen konnte eine gesteigerte Motivation, Lernbereitschaft und schnellere Detektion von Baustellensicherheitsmängeln nachgewiesen werden. Mit dem gleichen Ergebnis schloss Abdellatif [4] sein Projekt zur kollaborativen Untersuchung und interaktive Visualisierung eines 3D-Gebäudemodells in einer AR-Anwendung ab. Hier konnten semantische Informationen in realen Gebäuden über virtuelle Objekt mittels AR eingeblendet werden. Auch Perlman et al. [230] zeigt das innerhalb einer VR-Anwendung das Verständnis für Gefahren auf Baustellen größer ist als durch traditionelle Verfahren wie z. B. Fotos. Im Bereich des Ablauftrainings zeigen Eller et al. [92], Farra et al. [106] und Grabowski und Jankowski [121] VR- bzw. Erweiterte Virtualität-Anwendungen um neben der Wissensvermittlung auch das sogenannte „Muskelgedächtnis“ zu trainieren. Das dies sinnvoll ist, belegen Sacks et al. [252] mit dem Vergleich von traditionellen und VR-Training. Der Ansatz hierbei ist, dass durch Durchführung der Abläufe in einer möglichst natürlichen Art und Weise, diese im Ernstfall durch den Körper selbstablaufend durchgeführt werden können. Hierfür ist ein räumlicher Bezug und die räumliche Darstellung entscheidend, Farra et al. [106] bespielen dabei das Szenario einer Entfluchtung im Katastrophenfall für Krankenhäuser und ziehen Rückschlüsse auf die geplanten Fluchtwege. Grabowski und Jankowski [121] stellt ein Szenario für das Sicherheitstraining im Minenbau dar. Eller et al. [92] stellten neben dem Ablauftraining ein Szenario mit zwei Phasen sowie Rechten und Rollen vor. In der ersten Phase konnten in einem kollaborativen Besprechungsraum die Anwendenden das durchzuführende Szenario besprechen und je nach der eingenommenen Rolle über einen virtuellen Planspieltisch beeinflussen. Anschließend konnten die verschiedenen Rollen, das definierte Szenario im Digitalen trainieren und Beobachter auf verschiedenen internetfähigen Geräten mit verfolgen. In einer Reflexionsphase konnte die Durchführung erneut durchgesprochen werden. In allen Anwendungen waren die Ergebnisse vielversprechend, Grabowski und Jankowski [121] betonen, dass ein großer Sichtfeld für das Resultat besser ist.

Am IIB wurde mit der gleichen Argumentation ein Erweiterte Virtualität-Training mit Feuerlöschern entwickelt, welches durch die Nutzung und Durchführung in einer virtuellen Umgebung auch in großen

Teilen automatisch ausgewertet und analysiert werden kann. Durch das automatisierte Feedback nach einer Trainingseinheit an den Anwendenden konnte in einer Studie gezeigt werden, dass eine rasantere Lernsteigerung und somit Verbesserung in der Nutzung durch den Anwendenden stattfindet [211]⁵. Eine andere Untersuchung im Rahmen des e-Learnings innerhalb einer VR-Applikation, zeigte die Möglichkeit Grundlagen der Ingenieurwissenschaften wie Technische Mechanik immersiv und interaktiv zu gestalten [124]. Einen ähnlichen Ansatz verfolgt ein Forschungsprojekt von Krischler [167], welche die Tragwerkslehre interaktiv in VR und AR nutzbar machen wollen. Eine Untersuchung und Studie zum Erfolg dieser Methode steht noch aus.

Das auch mehr Sinne als die visuelle, auditive und haptische Wahrnehmung im Bereich der Lehre genutzt werden können, zeigen Richard et al. [246]. Mit einer eigenen Entwicklung im Bereich der Haptik und der Kopplung mit der Ausströmung von Duftstoffen, konnte sie zeigen, dass Lerninhalte verbunden mit Düften, den Studierenden länger in Erinnerung bleiben. Die Entwicklungen im Bereich der Lehre sind zahlreich und größtenteils vielversprechend, da mit der gleichen Argumentation von Serious Games, Studierende mehr motiviert werden und neben der Wissensvermittlung auch das Muskelgedächtnis und der räumliche Bezug trainiert und genutzt werden.

3.2.3 Anwendungen im Bereich der Planung im Bau- & Umweltwesen

Im Bereich der Planung von Anlagen im Bau- und Umweltwesen werden verbreitet 3D-Visualisierungen genutzt, um den Interpretationsspielraum der einzelnen Fachleute so gering als möglich zu halten und konstruktive Fehler gemeinschaftlich leichter zu erkennen. Hierbei bietet BIM und die BIM-Methodik große Vorteile und Potentiale. Kieferle und Woessner [159] setzten eine Anwendung um, welche über die Autodesk Revit-API die BIM-Datenbank anspricht und somit die Informationen Geräte-übergreifend angezeigt, bearbeitet und synchronisiert werden können. Bowman und McMahan [39] nutzten die räumliche Visualisierung in einer 360°-Ansicht innerhalb von Besprechungen. Sie zeigten, dass dadurch Fehler schneller erkannt, leichter erklärt und der Gesamtplanungsprozess mit geringer Anzahl an Konflikten abgeschlossen werden konnte. Zu dem gleichen Ergebnis kommen Chu et al. [60], welche sogar von einer 50 %-igen Geschwindigkeitssteigerung sprechen. Das Prinzip die Fehlerdetektion für verschiedene Spezialisten einfacher zu gestalten, indem das Vorstellungsvermögen mittels räumlicher und interaktiver Visualisierung unterstützt wird, ist vielversprechend [5], [75]. Es können dadurch an Planungszeiten und -kosten gespart werden, wobei die Qualität der Produkte gleichzeitig gesteigert wird. Die Automobilebranche nutzt dieses Vorgehen bereits länger, um Prototypen von Autos kollaborativ zu untersuchen und aufwendige Simulationsergebnisse direkt anzeigen zu können [357].

VR und AR wirken sich positiv auf die Zeit der Entscheidungsfindung aus, welche von Golparvar-Fard et al. [115] als den Bereich der größten Zeitressource für Besprechungen identifiziert wurde. Das Skizzieren und verständliche Aufzeigen der Probleme kann mit der räumlichen und immersiven Darstellung verkürzt werden. Deshalb haben Roupe et al. [250] die Planung mit neuen Technologien der Digitalen Realität kombiniert und unterstützt. In ihrer Anwendung kann der räumliche Bezug über VR wahrgenommen und Diskussionen mit anderen Beteiligten durchgeführt werden. Gleichzeitig können an einem Touch-Table ($\hat{=}$ Fishtank-Display) Änderungen durchgeführt und somit die Änderungswünsche eintra-

⁵ YouTube-Video: <https://www.youtube.com/watch?v=q1yCj4jkK7k> Aufgerufen am 14.04.2020.

gen und ausprobiert werden. Roupe et al. [250] betonen die gesteigerte Kreativität und Lösungsfindung. Ebenfalls wurde dabei festgestellt, dass Anforderungen und Probleme, die vorher nicht bekannt waren, direkt in der immersiven Darstellung detektiert und gelöst werden können. Dies verringert das Konfliktpotential und deckt das Problem ab, dass eine Anforderungsanalyse meist nie abgeschlossen ist. Dies ist also eine Möglichkeit den Kunden und seine Wünsche mit einer künstlich realistischen Darstellung des Objekts besser einfangen und erfüllen zu können.

Die Planung ganzer Städte und Quartiere über virtuelle Umgebungen [10] oder das Erweitern durch einfache CAD-Werkzeuge in VR [90] wurden bereits umgesetzt. Im Bereich der Planung steckt ein großes Potential zur Nutzung neuer Technologien wie VR und AR. Missverständnisse können beseitigt werden, bevor diese entstehen und die BIM-Methodik kann in verschiedenen Wegen an die Digitale Realität angeschlossen werden. Es gibt bereits jetzt erfolgreiche Umsetzungen, die Bestrebungen nach einer weiteren Verknüpfung von BIM zur Digitalen Realität fordern.

3.2.4 Anwendungen im Bereich der Planausführung und des Baus

Ist im Bereich der Planung der Anteil der Nutzung von VR größer, so ist dies bei der Planausführung und Bau bei AR. Dies liegt vermehrt daran, dass VR zeit- und ortsunabhängig genutzt werden kann, aber auch, da im Bau der Fortschritt und der Vergleich zur Planung interessant ist. Dieser Abgleich von Soll und Ist kann objektbasiert über AR eingeblendet und visualisiert werden. Die Abweichungen sind dann ebenfalls für das nicht planende Personal leicht erkennbar und verständlich [7], [17], [130], [131], [169], [260], [339], [358]. Kwon et al. [169] und Schoenfelder und Schmalstieg [260] entwickelten computergestützte Möglichkeiten die natürlich reale Objekte mit den künstlich realen aus dem BIM automatisiert vergleichen und die Abweichungen virtuell anzeigen. Schoenfelder und Schmalstieg [260] stellten dabei fest, dass die beste Hardware zur Nutzung ein Tablet ist. Die Akzeptanz der Visualisierung mittels anderer Hand-Held-Display-Geräte oder Head-Mounted-Display wäre in einer von ihnen durchgeführten Untersuchung geringer. Einschränkungen bei Kwon et al. [169] gibt es durch den Einsatz von Markern. Diese müssen vorher akkurat angebracht werden, damit eine genaue und übereinstimmende Visualisierung stattfinden kann. Dann allerdings können sie Fehler bei der Bewehrung von Stahlbeton ausreichend genau detektieren und visualisieren. Dabei zeigen sie zusätzlich eine Lösung, die Kamerabilder auch über das Internet überträgt und somit eine AR-Fernwartung ermöglicht.

Um das Problem der Einmessung und Platzierung von Markern zu umgehen und dennoch das BIM mit der natürlichen Realität zu verknüpfen, entwickelten Bae et al. [17] ihre Lösung. Diese AR-Anwendung erzeugt anhand der Aufnahme zahlreicher Kamerabilder eine Punktwolke des aktuellen Zustandes. Nachdem dies einmalig durchgeführt wurde, kann ähnlich wie bei ARKit und ARCore (siehe Kapitel 3.1.9) bei weiterer dynamischer Kameraaufnahme mittels verschiedener Algorithmen die Position des neuen Bildes in der Punktwolke ermittelt werden. Nach der Ortung erfolgt der Abgleich mit dem BIM und anschließend die virtuelle Einblendung in das Kamerabild. Die beschriebene Erfolgsrate liegt bei 95,38 % und benötigt zwischen 3-6 Sekunden für den vollständigen Prozess der Aufnahme, Analyse und Einblendung. Es kann aber nicht nur der Soll-Ist-Vergleich durchgeführt werden, sondern auch der geplante zeitliche Ablauf des Baus auf der Baustelle zum besseren Verständnis der Bausausführenden angezeigt werden. Hammad et al. [131] zeigen eine kollaborative AR-Anwendung, die anhand von GPS die Position bestimmt und Baustelleneinrichtungen und Maschinen wie beispielsweise Krane visualisiert. Dabei können

Abläufe und Positionen angezeigt werden. Al-Adhami et al. [7] und Zaher et al. [358] visualisieren hingegen den Baufortschritt anhand der Planung. Zaher et al. [358] exportieren hier automatisch den zeitlichen Ablauf als Video und spielen diesen in AR ab. Anders ist es bei Al-Adhami et al. [7], welcher den Fortschritt anhand der virtuellen Objekte direkt an der passenden Stelle anzeigen.

Neben der Einrichtung und dem geplanten zeitlichen Ablauf zeigt Park und Kim [228] eine AR-Applikation, die hilft Sicherheitsmängel auf Baustellen zu detektieren und eine Risikoabschätzung durch zusätzliche Einblendungen zu vereinfachen. Dabei ist aber noch keine automatische Zuordnung des Mangels zum Kamerabild möglich, lediglich die Mehrinformationen erfolgen. Park und Kim [228] halten allerdings fest, dass die dreidimensionale Visualisierung dem Verständnis für Risiko und Mängel sehr hilfreich ist. Im Bereich der Planausführung sind somit vermehrt Abgleiche und Fortschrittskontrollen in AR interessant und konnten bereits einige erfolgreiche Ansätze implementiert werden.

3.2.5 Anwendungen im Bereich des Betriebs und der Wartung im Bau- & Umweltwesen

Auch im Betrieb und Wartung sind vermehrt Applikationen mittels AR interessant. Kim et al. [160] schaffen durch die Abbildung zahlreicher Bewehrungsobjekte basierend auf detaillierten Kameraaufnahmen die Erweiterung mit AR. In ihrer Applikation können in Echtzeit Bilder von Bewehrungen analysiert und Baukonstruktionsfehler detektiert sowie visualisiert werden. Dabei wird das Ergebnis nicht dynamisch erstellt, sondern ergibt ein statisches Bild mit virtuellen Zusätzen. Kim et al. [161] beschreiben die Möglichkeit dies für andere Objekte für die Wartung in fertigen Gebäuden zu erweitern.

Ein anderer vielversprechender Anwendungsbereich ist der Bereich der energetischen Betrachtung von Anlagen im Betrieb. Hierfür zeigen Heydarian et al. [140] das automatische Einlesen von Sensordaten und Anzeigen in einer immersiven virtuellen Umgebung. Damit soll das Verständnis von Energie zur Anlage und dem Verbrauch bezüglich der geometrischen Struktur für Anwendende verbessert werden. Ein ähnlicher Ansatz wurde am IIB als VR-Applikation entwickelt. Mittels der vom BIM zur Verfügung gestellten Daten wurden über die Energiesimulationssoftware EnergyPlus⁶ raumbezogene Energieverbräuche und Temperaturen ermittelt bzw. simuliert. Diese Simulationsdaten wurden gemeinsam mit dem BIM in der virtuellen Umgebung mit räumlichem Bezug in unterschiedlichen Darstellungsarten visualisiert [20]. Es konnte damit gezeigt werden, dass der immersive Raum den Bezug von raumbezogenen Daten zur Gebäudestruktur steigern und dass dies für das Verständnis zur Optimierung des Betriebs einer Anlage hilfreich sein kann.

3.2.6 Eigene Entwicklungen im Kontext digitaler Ingenieurmethoden

Im Rahmen der eigenen Forschungsarbeit am IIB wurden einige Entwicklungen und Untersuchungen im Bereich der VR, Erweiterte Virtualität und AR betrieben, die teilweise unveröffentlicht aber auch veröffentlicht wurden [29], [90]–[93]. Diese haben im Wesentlichen dazu beigetragen ein wesentliches Grundverständnis innerhalb der verschiedenen Technologien der Digitalen Realität zu erhalten und Grenzen dieser aber auch des Building Information Models zu erkennen. Auch wurden zahlreiche Probleme in der tatsächlichen Entwicklung und der für den Erfolg dieser Technologien so wichtigen Schritt

⁶ <https://energyplus.net/> Aufgerufen am 13.12.2019.

der einfachen Anbindung zwischen Ingenieurwissenschaften und Werkzeugen identifiziert und teilweise gelöst. Daneben wurden die Möglichkeiten von Immersion, Präsenz und Interaktion selbst erlebt oder mittels Feldversuchen mit Studierenden erfasst. Daneben wurden einige im bezugnehmende studentische Abschlussarbeiten betreut [20], [124], [189], [211], [300].

Für die Entwicklung von Erlebnissen in VR, Erweiterte Virtualität oder AR gibt es aus der Computerspielbranche einige Entwicklungsumgebungen und Technologien. Diese sind beispielsweise Unity3D ($\hat{=}$ Unity), UnrealEngine, CryEngine Crytek, Delta3D [275] und z. B. Web Player, HTML5, WebGL, WebVR. Die nun vorgestellten Forschungen wurden mit Unity umgesetzt. Anfänglich richtete sich die Forschung auf die Nutzung oder die Erweiterung von BIM in VR. In Eller [90] wurden einige Methoden zur Durchführung von Computer Aided Drawing/Design in einer VR-Applikation vorgestellt. Dabei konnten Wände, Türen und Fenster platziert und somit das 3D-Gebäudemodell erweitert werden. Eine gewisse Intelligenz zur Vermeidung falscher Platzierung wie z. B. ein Fenster in der Türe, sowie Objektfang zur exakten Überschneidung von Wänden wurden hinzugefügt. Um den Mehrwert der immersiven räumlichen Darstellung zu nutzen, kann das Modell skaliert, Texturen verändert und Lichtverhältnisse angepasst werden. Es ist möglich einen vollständigen Tagesablauf in kurzer Zeit ablaufen zu lassen, um die geplante Struktur auf den Lichteinfall hin und das entstehende Gefühl dadurch zu analysieren. Die Forschung zur Anbindung des Building Information Models endeten mit dem bereits in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Ansatz zur automatischen Trennung und Wiedervereinigung von semantisch und geometrischen Daten als verlustfreie Exportvariante [29].

Zeitgleich ging es um die Entwicklung von Mehrwerten durch die Kombination von Simulationen, Sensoren und dem 3D-Gebäudemodell. Hierfür wurden entweder berechnete Daten aus EnergyPlus⁶ in VR mit farblichen Verläufen und räumlichen Bezügen [20], oder Werte aus im Gebäude platzierten Sensordaten in der virtuellen Umgebung visualisiert [189]. Dies diente dazu, das Verständnis zu vergrößern und den direkten Bezug einzelner Elemente herzustellen. Dies wurde ebenfalls in einer markerbasierten AR-Applikation für das Smartphone umgesetzt, um unsichtbare Sensoren direkt visualisieren und zwischen den einzelnen Werten abhängig des Abstandes zum Sensor interpolieren zu können [300]. Über den eigentlichen Messwert hinaus konnten somit raumbezogene Informationen gewonnen werden. Diese Interpolation beruhte dabei auf einer vorausgegangenen und nicht veröffentlichten Untersuchung mit Hilfe von bauphysikalischen Messwerten. Hier wurden diese in AR in verschiedenen Farben dargestellt und die fehlenden Zwischenräume dreidimensional interpoliert. Anschließend wurden einzelne virtuelle Partikel visualisiert und von Messwert zu Messwert bewegt. Während der Bewegung sind die Farben dynamisch angepasst worden und spiegeln die interpolierten lokal herrschenden Messwerte wider. Ein farblicher Volumenstrom ist dadurch entstanden und innerhalb der undurchsichtigen Gebäudestruktur erkennbar.

Neben dieser Forschung strebten die Entwicklungen Richtung Ausbildung und Training von Ingenieurspezifischen Fragestellung im Rahmen von VR und Erweiterte Virtualität. Hierfür wurde in Zusammenarbeit mit einigen Kollegen eine öffentlichkeitswirksame Erweiterte Virtualität-Anwendung im Bereich des Trainings der Brandbekämpfung entwickelt und stetig mit Software und Hardwareseitigen Funktionalitäten erweitert. So handelt es sich bei der Anwendung um ein Training welches die visuelle, auditive und haptische Wahrnehmung nutzt. Die haptische Wahrnehmung erhält durch den Einsatz natürlich realer Objekte wie den Feuerlöscher und den Einsatz einer wärmeaustrahlenden Weste eine hohe Immersion,

gesteigerte Präsenz und Natürlichkeit. In weiteren Spezialisierungen wurde diese Anwendung mit einem automatischen Feedback-System zur Lernsteigerung versehen [211] und die Kollaboration auch Technologie übergreifend umgesetzt. So ist es möglich in einer 3D-Anwendung über das Internet mit der gleichen virtuellen Umgebung verbunden zu sein, wie der Trainierende in Erweiterte Virtualität oder VR [92]. Dies ermöglicht eine ortsungebundene Beobachtungsrolle.

Es konnten wie hier gezeigt in der Forschungsarbeit einige Erkenntnisse und Qualifikationen im Umgang mit der Digitalen Realität und den Ingenieurwissenschaften unterschiedlicher Bereiche gewonnen werden, die hier in der Arbeit genutzt werden.

3.2.7 Diskussion zur Verwendung neuer digitaler Ingenieurmethoden in der Digitalen Realität

Da es Anwendungen und Bereiche zur Nutzung von Digitaler Realität in den Ingenieurwissenschaften gibt und neue digitale Ingenieurmethoden teilweise traditionelle Arbeitsweisen verändern, wurden in den letzten Abschnitten dieses Kapitels erläutert. Da diese digitalen Ingenieurmethoden grundsätzlich funktionieren, haben einzelne Forschungen und Untersuchungen gezeigt. Es stellt sich aber die Frage, ob der Einsatz der VR, Erweiterte Virtualität, AR und Mixed-Reality-Technologien für die Ingenieurwissenschaften sinnvoll sind. Diese Frage soll Grundlage der folgenden Diskussion sein.

Esser et al. [97] zeigen in ihrer Studie, dass die eingesetzten Investitionen in diesen Bereich in den vergangenen Jahren gestiegen sind und in den folgenden weiter zunehmen werden. 840 Millionen Euro Investitionen und Umsätze von 88 Millionen Euro mit einer Zuwachsrate von 37 % sind prognostiziert [97]. Dabei entspricht dies der Gesamtmenge, welche unter verschiedenen Branchen aufgeteilt werden muss. In der Erhebung von Potentialen der Mixed-Reality von Zabel et al. [357] wird der Anteil von Architektur auf 24 % und der vom Bauwesen auf 16 % geschätzt. Dabei wird sowohl von ihnen als auch von Osmer [227] durch eine allgemeine Befragung von Herstellern, Entwicklern und Forschern das große Potential aufgezeigt und nachgewiesen.

Eine Ingenieurspezifischere Befragung von Lawson et al. [173] kommt zu dem Ergebnis, dass Potentiale vorhanden sind, aber die Anbindung zu komplex und schwierig ist. Hier werden mehr Lösungen und daraus folgenden Anwendungen gefordert, die vor allem VR umsetzen. Abdelhameed [3] sieht dies schon ein wenig kritischer und erwägt VR nur als Option beim Einsatz von BIM oder zumindest einem 3D-Gebäudemodell. Ansonsten sei der Aufwand zu groß. Die Kreativität, halten sie fest, steige durch die Nutzung der neuen Methoden. In Bezug auf die Schnelligkeit und Genauigkeit zielgerichteter Aufgaben innerhalb von immersiven Anwendungen äußern sich Bowman und McMahan [39] positiv. Allerdings stellen sie fest, dass dies nur bei der höchsten Immersionsstufe signifikante Unterschiede hervorruft, welche mit hohen Kosten verbunden ist. Ob diese immer gerechtfertigt ist, stellen sie in Frage. Ein klarer Mehrwert kann nicht monetär beziffert werden. Auch äußern sich Buttussi und Chittaro [49] und Leder et al. [176] negativ, da sie keine deutlichen Lernsteigerungen mittels VR nachweisen konnten.

Andere Forscher äußern sich positiv zu den digitalen Methoden, da diese die Möglichkeit bieten zeit- und ortsunabhängig zu arbeiten und gefährliche Situationen oder Stoffe zu vermeiden bzw. künstlich abzubilden [340], [342]. Die Potentiale von Digitaler Realität sind da und Gelder werden investiert. Diese werde sicher nicht in allen Bereichen einen Mehrwert bringen, dennoch ist es im Konsens aller empfehlenswert in die Anbindung und Schnittstelle von Ingenieurwissenschaften und Digitaler Realität zu investieren. Ansonsten sind all diese Ergebnisse schwer verwertbar und vergleichbar. Das liegt zum

einen daran, dass die Begriffe in Bezug auf die Digitale Realität nicht immer richtig verwendet werden und somit Vergleiche entstehen, die nicht gemacht werden können. Des Weiteren unterliegen die Technologien einer rasanten Entwicklung, die erst in dem letzten Jahrzehnt richtig an Pfad aufgenommen hat (siehe Abbildung 3-1). Viele Studien und Untersuchungen sind mit Head-Mounted-Displays gemacht worden, die keine ausreichende Auflösung, Sichtfeld und Freiheitsgrade ermöglichen. Daneben sind bei vielen, aufgrund der fehlenden Interaktion oder Fortbewegung, noch keine richtigen Umsetzungen der VR als Grundlage verwendet worden. Deshalb ist für es für zukünftige Entwicklungen wichtig neben der Einteilung in verschiedene Technologien auch das Level bzw. Detailgrad dieser genauer zu definieren. Im nächsten Kapitel wird ein Vorschlag zur Lösung dieses Problems unterbreitet.

3.2.8 Zusammenfassung im Bereich der Ingenieurwissenschaften

Innerhalb dieses Kapitels wurden prototypische Applikationen und Anwendungsfälle in Bezug der Ingenieurwissenschaften als neue digitale Ingenieurmethoden mit der Digitalen Realität vorgestellt. Dabei wurde gezeigt, dass im Bereich der Lehre, Ausbildung, Training und Planung im Bau- und Umweltwesen der Fokus auf der Verwendung von VR und Erweiterte Virtualität liegen. In den Bereichen Planausführung und Betrieb werden hingegen mehr Lösungen mit AR gesucht und entwickelt. Dies liegt an der Unabhängigkeit von Zeit und Raum innerhalb von VR-Applikationen. Dagegen bietet AR den direkten Bezug mit der natürlichen Realität für die Verwendung auf Baustellen und in Anlagen. Daneben wurden die eigenen Vorleistungen und ingenieurspezifischen Forschungen im Bereich von VR, AR und Erweiterte Virtualität aufgezählt und die Qualifikation für diese Arbeit zu bestätigen.

In allen Bereichen wurden erfolgreiche Projekte aufgezählt und auch die Probleme und Kritiken der Forschenden ausgearbeitet. Diese wurde anschließend nochmals kurz in einer Diskussion gegenübergestellt und der Schluss gezogen, dass für eine klare Aussage die verwertbare Datengrundlage fehlt. Aufgrund der medial falsch verwendeten Begriffe und fehlende Definition verschiedener Detailstufen der Technologien der Digitalen Realität ist ein Gesamtvergleich nahezu unmöglich. Das generelle Potential und der Aufruf nach Lösungen zur Anbindung und für weitere Anwendungen ist aber im Gesamtkontext gegeben.

3.3 Zusammenfassung der Analyse

In diesem Kapitel wurde der Oberbegriff der Digitalen Realität eingeführt und traditionelle und neue Technologien, Medien und Hardwaresysteme wie auch die vorher erläuterten Displayarten zugeordnet und durch klare Abgrenzungen die Beziehungen untereinander festgelegt. Dabei wurden die Begriffe des Freiheitsgrade und Anwendungsbereiche beschrieben, in ihren Bestandteilen erläutert und definiert. Beide Parameter dienen dem Vergleich und spiegeln die natürliche Bewegungsfreiheit und den Anwendungsbereich dieser wider. Fokus in diesem Kapitel lag auf den Technologien der VR, AR und Erweiterte Virtualität. Diese wurden von 360°-Medien abgesetzt und über das erweiterte Milgram's Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum in Abhängigkeit von Abstraktion und Immersion sowie der Freiheitsgrade gebracht (siehe Abbildung 3-2).

Anschließend wurde der Einsatz dieser Medien als neue digitale Ingenieurmethoden im Bereich der

Ausbildung und Training, wie auch in der Planung, Planausführung und Wartung im Bau- und Umweltwesen aufgezeigt. Entwickelte Applikationen und Anwendungsfälle wurden kurz beleuchtet und anschließend die Sinnhaftigkeit des Einsatzes neuer Medien diskutiert. Dabei ergab sich, dass neben einiger Kritik aufgrund des technologischen Entwicklungsstandes auch sehr viele positive Ergebnisse im Einsatz entstanden sind. Eine abschließende Beantwortung ist allerdings nicht möglich, da die nötigen Vergleichsparameter fehlen. Bisherige Untersuchungen sind zu unterschiedlich oder es fehlen genaue Angaben, klare Definitionen der genutzten Systeme bzw. Medien und Detailstufen von Immersion und Präsenz.

4 Pan-Faktor: Konzept zur Bewertung und Entwicklung digitaler Ingenieurmethoden der Digitalen Realität

„Bei mancher Botschaft nützt ein ungesagtes Wort!“ - Aischylos

Die Kapitel der Grundlagen und Analyse warfen die Fragen auf, wie Anwendungen innerhalb der Digitalen Realität miteinander verglichen werden können. Die einheitliche Bewertung von Immersion und Präsenz wurde als erstrebenswert herausgestellt und die Kennwerte der Freiheitsgrade und des Anwendungsbereich vorgestellt. Mit einer vergleichenden Möglichkeit könnten Anwendungen aber auch Forschungen in Relation zueinander gesetzt werden. Ebenfalls zeigte sich, dass für digitale Ingenieurmethoden ein natürlicher Realismus sinnvoll ist. Aber es ist schwierig, festzustellen, welcher künstliche Abbildungsgrad erreicht werden kann. Eine Übersicht über Möglichkeiten, sowie die Empfehlung zur Entwicklung oder Weiterentwicklung von Anwendungen im Vergleich zu anderen und zum Möglichen ist daher erstrebenswert.

Diese Fragen sollen mittels Konzepten zur Lösung im folgenden Kapitel vorgestellt werden. Vorausgehend ist eine ausführliche Analyse technischer Möglichkeiten von verschiedenen Displays und Erläuterung der vorhandenen Kennwerte der Freiheitsgrade und Anwendungsbereiche. Darauf aufbauend wird in Form des hier neu entwickelten Pan-Faktors ein bewertbarer Vergleichsparameter beschrieben, welcher wichtige Werte im Bereich der Immersion, Präsenz und Wechselwirkung beinhaltet. Mit Hilfe dieses Faktors können zukünftig Applikationen in unterschiedlichen Bereichen bewertet und anschließend miteinander verglichen werden. Der Pan-Faktor wird in seinem Konzept und Aufbau erläutert sowie darauf aufbauend ein neues Konzept für eine Handlungsempfehlung für Ingenieure und Ingenieurinnen vorgestellt. Eine Handlungsempfehlung zur Entwicklung und Weiterentwicklung von Applikationen innerhalb der Digitalen Realität im Bereich der digitalen Ingenieurmethoden. Diese Handlungsempfehlung gibt einen gezielten Überblick über die Lösungsmöglichkeiten unterschiedlicher Anwendungen, ohne dabei Wissen in den Bereichen der Digitalen Realität vorauszusetzen.

Das folgende Kapitel beschreibt die Konzepte unterstützt durch die vergangenen Grundlagen und Analyse, um durch Vergleich und Empfehlung die Innovationen und die Vielfalt der digitalen Ingenieurmethoden mit Hilfe der Digitalen Realität zu erweitern.

4.1 Datenaufnahme und Datenbewertung

In Kapitel 3.1.2 wurde der Anwendungsbereich bzw. die Größe des durch die Applikation möglich genutzten Raums mit der Formel 3.1 beschrieben. Dabei steht der Mensch als nutzende Person im Fokus und wird von diesem ausgehend der Bereich definiert. Hardware oder Softwaresysteme können den Anwendungsbereich verringern, indem sie die Freiheitsgrade limitieren oder die Möglichkeiten der

Bewegung einschränken. Grundlegend gilt, dass maximal ein Anwendungsbereich von 100 % erreicht werden kann, wenn der Nutzungsbereich der künstlichen Realität mit der natürlichen Realität übereinstimmt. Um diese Nutzungsbereiche definieren zu können, wird ein virtueller Raum um den Nutzenden gespannt. In der natürlichen Realität kann der Mensch innerhalb dieses Raums 117 Freiheitsgrade oder vereinfacht sechs Freiheitsgrade nutzen. Es stellt sich also die Frage für wie viel Prozent der Freiheitsgrade auf wie viel Raum in der virtuellen Repräsentation genutzt werden kann.

Im Fall der visuellen und auditiven Wahrnehmung wird dieser Raum als Würfel festgelegt und wird in seine einzelnen Flächen aufgefaltet und anschließend bewertet, wie viele Flächen und wie viel Prozent davon durch das Hardwaresystem genutzt werden können (siehe links oben in Abbildung 4-1).

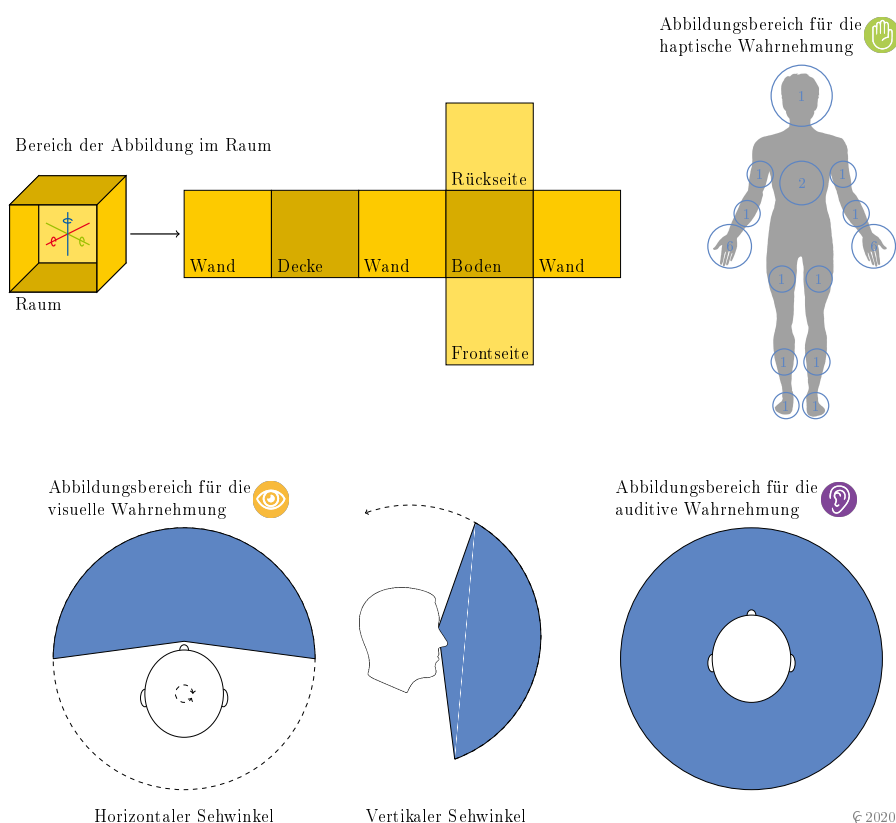


Abbildung 4-1: Anwendungsbereiche (FOR) verschiedener Sinne des Menschen

4.1.1 Anwendungsbereich und Freiheitsgrade der auditiven Wahrnehmung

Die auditive Wahrnehmung in der natürlichen Realität spannt sich über den gesamten Raum und so kann der Mensch den Ort der Tonquelle in freier Bewegung erkunden. Deshalb kann durch das Zählen der künstlich bespielten Flächen der Anwendungsbereich bestimmt werden (siehe blauer Bereich rechts unten Abbildung 4-1). Es ergibt sich für die auditive Wahrnehmung aus Formel 3.1 die Formel 4.1.

$$\text{FOR} = \frac{n}{7} * 100 \quad (4.1)$$

mit: Maßeinheit := %

n := Anzahl der bespielten Seiten innerhalb der künstlichen Realität

7 := maximale Seitenanzahl des würfelförmigen Raumes

Im Rahmen dieser Arbeit wurden 35 Audiosysteme im Bereich der World-Fixed-Display, Ear-Mounted-Displays, In-Ear-Displays und Over-Ear-Displays verschiedener Preisklassen (129 € bis 3.700 €) analysiert und mit dem Anwendungsbereich und den Freiheitsgraden bewertet. Diese können in Tabelle A-2 eingesehen und die einzelnen Zahlenwerte zu jedem Produkt nachvollzogen werden. Durch die hervorragenden technischen Möglichkeiten zur Repräsentation von Ton und Sound und der dabei entstehenden Bewegungsfreiheit von durchschnittlich 6 Freiheitsgrade liegt der Anwendungsbereich meist bei 100 % und minimal bei 83 % (siehe Tabelle A-2). Es wurden nicht mehr als 35 Hardwaresysteme untersucht, da von einer Steigerung nicht auszugehen ist und die Anzahl bereits ausreicht, um eine Aussage treffen zu können. Das Niveau an Lautsprechersystemen und die softwareseitige Darstellung von Sound ist bereits durchschnittlich sehr hoch.

4.1.2 Anwendungsbereich und Freiheitsgrade der visuellen Wahrnehmung

Ähnlich der auditiven Wahrnehmung spannt sich der Nutzungsbereich der visuellen Wahrnehmung über den gesamten Raum. Dabei besteht die Freiheit des vollumfänglichen Sehens in der Bewegung des Kopfes, der Rotation des Körpers und den Sehwinkeln der horizontalen und vertikalen Richtung. In Abbildung 4-1 links unten und Mitte werden der horizontale und vertikale Sehwinkel mit dem blauen Abdeckungsbereich visualisiert. Dieser Bereich kann durch die Bewegung, wie sie gestrichelt dargestellt ist, erweitert werden. Es ist dem Menschen dadurch in der natürlichen Realität möglich 200° in horizontaler und 130° in vertikaler Richtung zu sehen und dies auf allen 7 Seiten des würfelförmigen Raumes. Somit ist der Anwendungsbereich im Visuellen abhängig der genutzten Seiten und möglichen Sehwinkel, wie Formel 4.2 beschreibt.

$$\text{FOR} = \frac{n * (\alpha + \beta)}{7 * (200 + 130)} * 100 \quad (4.2)$$

mit: Maßeinheit := %

n := Anzahl der bespielten Seiten innerhalb der künstlichen Realität

α := horizontaler Sehwinkel

β := vertikaler Sehwinkel

7 := maximale Anzahl der Raumseiten

200 := maximaler horizontaler Sehwinkel

130 := maximaler vertikaler Sehwinkel

Die Freiheitsgrade der visuellen Wahrnehmung kann bei maximal bei 6 liegen und beinhaltet die vollständige Körperbewegung und Drehung. Bei 74 analysierten Bildschirmsystemen der World-Fixed-Displays und Head-Mounted-Displays innerhalb der Preisklassen von 13 € bis zu 21.710 € wurden durchschnittlich fünf Freiheitsgrade festgestellt. Dies liegt allerdings an dem Fokus der Analyse von neuen Systemen der VR-Technologie, welche eine mobile Bespielung ermöglicht. Vergrößern Head-Mounted-Displays den Anwendungsbereich durch die Möglichkeiten der Rotation, sind aktuelle Systeme

noch nicht in der Lage die Sehwinkel vollständig auszunutzen. Deshalb liegt der Durchschnitt des Anwendungsbereichs der visuellen Wahrnehmung bei 42 % und maximal bei sehr wenigen Systemen bei 94 % (siehe Tabelle A-1). Die fehlenden Prozent entsprechen der Diskrepanz zwischen dem natürlichen Sichtfeld und dem möglichen Sichtfeld durch z. B. Head-Mounted-Displays.

4.1.3 Anwendungsbereich und Freiheitsgrade der haptischen Wahrnehmung

Der Nutzungsbereich der haptischen Wahrnehmung ist aufgrund der passiven und aktiven Wahrnehmungsform nicht auf den würfelförmigen Raum ausgelegt. Die Haut ist der Rezeptor und somit müsste die Hautfläche als Nutzungsbereich festgelegt werden. Damit dies handhabbar ist, wird diese Fläche in 25 Fixpunkte auf den menschlichen Körper festgelegt. Diese Punkte sind in Abbildung 4-1 rechts oben veranschaulicht. Dabei werden sensiblere Regionen wie die Hände in mehrere eingeteilt und somit erhält die Handfläche sowie jeder Finger einen Punkt. Der Torso ist mit jeweils einem vorne und einem auf dem Rücken bewertbar und somit können die Regionen gezählt und als Nutzungsbereich definiert werden (siehe Formel 4.3).

$$\text{FOR} = \frac{n}{25} * 100 \quad (4.3)$$

mit: Maßeinheit := %

n := Anzahl der bespielten Fixpunkte innerhalb der künstlichen Realität

25 := maximale Anzahl der festgelegten Fixpunkte

Auch in der Bewertung der Freiheitsgrade unterscheidet sich die haptische Form von den anderen Sinnen. Hier sind aufgrund der Größe des Sinnesorgans nicht die vereinfachten 6 Freiheitsgrade anzusetzen, sondern die vollen 117 Freiheitsgrade des menschlichen Körpers, wie sie in Abbildung 3-4 dargestellt sind. Die Haptik kann am gesamten Körper wahrgenommen werden und deshalb muss das Erfahren dieses Sinns auf die vollständigen Freiheitsgrade ausgelegt sein. Oftmals verursachen Hardwaresysteme zur Bespielung der Haptik Einschränkungen in den Freiheitsgraden, was somit in die Bewertung mit einfließt.

Bei 64 analysierten Hardwarekomponenten wie Hand-Controllern, Handschuhe, Anzüge, u.ä. im Bereich der World-Fixed-Display, On-Body-Display und Hand-Held-Display in einer Preisklasse von 1.895 € bis 7.300 € zeigten sich durchschnittlich Freiheitsgrade von 37. Das Maximum steht bei 62 Freiheitsgraden von eigentlich erreichbaren 117 (siehe Abbildung 3-4). Dies liegt daran, dass die meisten Systeme nur auf bestimmte Regionen sprich Fixpunkte konzentriert sind und erst eine Kombination verschiedener Geräte die Anzahl der Freiheitsgrade steigert. Das Gleiche spiegelt sich bei der Betrachtung des Anwendungsbereichs wider, welcher einen Durchschnitt von 29 % aufweist. Das Maximum liegt bei 46 % und lässt damit noch auf einen Forschungs- und Entwicklungsbedarf schließen.

4.1.4 Anwendungsbereich und Freiheitsgrade der olfaktorischen und gustatorischen Wahrnehmung

Ähnlich wie die Haptik ist die olfaktorische und gustatorische Wahrnehmung nicht auf den würfelförmigen Raum beschränkt. Sind die Freiheitsgrade ziemlich klar mit dem Maximum von 6 anzusetzen, um die Einschränkungen durch Hardwaresysteme in der Bewegungsfreiheit abbilden zu können, so stellt die klare Definition des Anwendungsbereich eine Herausforderung dar. Es gibt keinen Raum und keine Fixpunkte zur einheitlichen Bezifferung. Allerdings gibt es Duft- und Geschmacksstoffe, welche als Nutzungsbereich definiert werden können. Dabei existiert das Problem, wie es in Kapitel 2.1.5 und 2.1.6 beschrieben ist, dass eine klare Aussage, wie viele Duft- und Geschmacksstoffe der Mensch wahrnehmen kann, fehlen. Im Bereich der gustatorischen Wahrnehmung ist der allgemeine Forschungskonsens bei 6 Geschmacksarten. Für die olfaktorische Wahrnehmung spricht man von 60.000 verschiedenen Düften, die angeblich unterscheidbar sind. Man versucht sich hier aber auf 30 Grunddüfte zu einigen. Um eine Möglichkeit zur Bestimmung des Anwendungsbereich in dieser Arbeit zu haben, werden diese Werte als Grundlage angenommen und mit der Formel 3.1 berechnet, wobei für die olfaktorische Wahrnehmung 30 und für die gustatorische Wahrnehmung 6 als Nutzungsbereich der natürlichen Realität eingesetzt werden.

In beiden Bereichen gibt es nur sehr wenig Hardwaresysteme und befinden diese sich meist nur in der Forschung als Demonstrator. Dennoch wurden 25 olfaktorische und 9 gustatorische Komponenten näher analysiert (siehe Tabelle A-6 & Tabelle A-7). Bei Kosten von 24 € bis hin zu 1.799 € für Duftsyste me liegen die maximalen Freiheitsgrade durch den Einsatz von World-Fixed-Display und On-Body-Display bei 6. Der Durchschnittswert liegt bei 5. Ähnlich hoch ist der Anwendungsbereich, welcher mit durchschnittlich 41 % ein Maximum von 100 % erreichen kann. Im Bereich der gustatorischen Wahrnehmung ist keine Preisklasse definiert, da es keine Produkte gibt. In den Forschungsansätzen sind dennoch Freiheitsgrade von 6 bei durchschnittlich 4 erreichbar. Der Anwendungsbereich liegt durchschnittlich bei 57 %. Diese Zahlen sind aber aufgrund der schwachen Definitionen basierend auf fehlenden Grundlagen und der geringen Anzahl an Hardwarekomponenten mit Vorsicht zu betrachten.

4.1.5 Anwendungsbereich und Freiheitsgrade von Bewegungsplattformen

Nicht nur die Sinneswahrnehmung kann mit den Hardwaresystemen bespielt und damit eine künstliche Realität aufgebaut werden. Ebenfalls die Bewegung und speziell die Fortbewegung ist ein Thema. Die Freiheitsgrade liegen hier erneut bei 117, da Bewegungsplattformen oftmals Fortbewegung ermöglichen, aber Freiheitsgrade des Menschen einschränken. So ist beispielsweise die Befestigung innerhalb einer solchen Plattform ein Hindernis in der freien Bewegung der Arme. In der natürlichen Realität sind im Kontext der Bewegung diese Freiheitsgrade in der gesamten Umgebung möglich. Theoretisch ist die Fortbewegung nahezu unendlich möglich. Was sich ändert ist die Form der Bewegung, wie Laufen, Schwimmen, Klettern, u.ä. Die Verwendung des virtuellen würfelförmigen Raumes für die Definition des Nutzungsbereiches ist nicht geeignet, da in der natürlichen Realität andere Grenzen gelten. Es werden deshalb die Bewegungsformen in ihrer nutzbaren Ausprägung gezählt. Sonderformen wie Schwimmen und Klettern werden vernachlässigt und sich ausschließlich auf die Fortbewegung bzw. Bewegung auf

festen Untergrund mit den Füßen beschränkt. So werden ähnlich wie bei der haptischen Wahrnehmung mit den Fixpunkten feste Definitionen geschaffen, welche mit 0 als nicht, 0.5 als teilweise oder 1 als vollständig nutzbar bewertet werden. Die hier festgelegten bewerteten Bewegungsformen sind das Stehen, Knien, Liegen, Sitzen, Laufen, Rennen, Hüpfen, Drehen und die freie Armbewegung. Es ergibt sich, dass neun Bestandteile festgelegt sind. Diese in die Formel 3.1 eingesetzt, ergibt folgende Formel 4.4.

$$\text{FOR} = \frac{n}{9} * 100 \quad (4.4)$$

mit: Maßeinheit := %

n := Anzahl der bespielten Bewegungsformen innerhalb der künstlichen Realität

9 := maximale Anzahl der möglichen festgelegten Bewegungsformen

51 verschiedene Simulatoren und Plattformen zur Übertragung von verschiedenen Bewegungsformen in die virtuelle Umgebung wurden in den Preisklassen von 250 € bis 9.500 € betrachtet und analysiert (siehe Tabelle A-8 & Tabelle A-9). Dabei ergaben sich durchschnittlich 16 Freiheitsgrade und ein Anwendungsbereich von 70 %. Die Maxima stehen bei 36 Freiheitsgraden und einem Anwendungsbereich von 89 %. Ähnlich wie bei der Haptik werden bei den Simulatoren nur einzelne Bewegungen fokussiert, wodurch die Freiheitsgrade in den anderen Bereichen stark eingeschränkt werden. Ein höherer Output wird nur durch Kombination erreicht, wobei es in keinem anderen Bereich so schwer ist, grenzenlos Bewegung zu ermöglichen. Das Problem sind meist die natürlichen Grenzen, welche über Festhaltemechanismen oder Simulatoren überwunden werden müssen.

Insgesamt wurden 258 verschiedene Hardwarekomponenten unterschiedlicher Displayarten analysiert und diese vergleichbar mit den Freiheitsgrade und dem Anwendungsbereich (FOR) beziffert (siehe Tabelle A-1, Tabelle A-2, Tabelle A-4, Tabelle A-6, Tabelle A-7 & Tabelle A-8). Diese Analyse und der damit verbundene Vergleich zwischen natürlicher Realität und Möglichkeiten innerhalb der künstlichen Realität diente dazu den nun folgenden Pan-Faktor in seinen einzelnen Bestandteilen in den Qualitäten zu bewerten und Kennwerte für den Anwendungsbereich und die Freiheitsgrade festzulegen.

4.2 Bewertungsskala für die Digitale Realität - Der Pan-Faktor

Im Kapitel 3.1 sind verschiedene Anwendungen der Digitalen Realität aufgezeigt und erläutert worden. Diese stehen unter einem stetigen Wandel, Verfeinerung sowie Erweiterung. Außerdem sind sie durch den Einsatz in vielen verschiedenen Fachrichtungen und Bereichen in unterschiedlicher Ausprägung, Details und Art vorhanden. Es gibt viele Möglichkeiten, um mit Hilfe der Digitalen Realität Anwendungen umzusetzen und somit Inhalte zu präsentieren (siehe Tabelle A-10). Chalmers und Ferko [52] schlagen mit ihrer Wahrnehmungsgleichung (siehe Formel 2.1) eine Lösung zur Bewertung von Anwendungen der Digitalen Realität vor. Allerdings betrifft dies nur einen kleinen Anteil der gesamten Anwendungen der Digitalen Realität, wie z. B. VR- & AR-Programme. Applikationen mit höherer Abstraktion, wie z. B. 2D- oder 3D-Anwendungen, werden nicht berücksichtigt. Außerdem gibt es keine objektive Beschreibung der Wichtungsfaktoren innerhalb der Formel 2.1 auf Seite 44, welche Chalmers und Ferko [52] zwar fordern, aber keinen Vorschlag zur Umsetzung erläutern. Es ist allerdings wichtig einen vergleichenden

Wert für unterschiedlichste Einsätze der Digitalen Realität zu definieren, um Vorschläge zur Umsetzung oder technische Möglichkeiten bestimmter Inhalte aufzeigen zu können. Dies ist auch wichtig um Fragestellungen wie in der Diskussion im Kapitel 3.2.7 eindeutig und klar beantworten zu können. Aktuelle Forschung ist zu unterschiedlich in ihrer Ausführung und Nutzung verschiedener Systeme, als dass eine einheitliche Aussage getroffen werden kann. Mit einer einheitlichen Bewertungsskala wäre dies möglich. Neben der Wahrnehmungsformel und dem Ansatz der mathematischen Abbildung betonen Baños et al. [18] ihre Erkenntnisse die Immersion und Präsenz betreffend. Die Präsenz ist im Falle eines emotionslosen Szenarios in erster Linie auf die Immersion zurückzuführen. Da Ingenieurmethoden hauptsächlich auf Szenarien beruhen, die keine Emotionen beinhalten, ist somit die Betrachtung der Immersion von größter Wichtigkeit. Eine subjektive Wichtung sollte ausgenommen sein.

Im Rahmen dieser Arbeit wird deshalb der Vorschlag unterbreitet eine eigene Skala für die möglichst objektive Bewertung und den Vergleich von unterschiedlichen Applikationen der Digitalen Realität anzuwenden. Da es aufgrund der Schwierigkeiten und Herausforderungen bisher keine Skala gibt, wird im Folgenden das Konzept für eine solche erweiterbare und objektive Bewertungsskala erläutert. Die Ziele einer solchen Skala sollen sein, dass sie universell für die Digitale Realität, einfach, erweiterbar, einheitlich, vergleichbar und detailliert eingesetzt und verwendet werden kann. In der Analyse wurde bereits Milgram's Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum [209] vorgestellt, welches VR, Erweiterte Virtualität und AR in Abhängigkeit des Realismus auf eine Skala projiziert. Dieses Kontinuum wurde im Rahmen dieser Arbeit mit der Definition der Digitalen Realität erweitert und in Abbildung 3-2 dargestellt. Dabei werden alle Technologien und Medien der Digitalen Realität auf das Milgram's Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum aufgetragen und in Abhängigkeit zu ihrem Bezug zur natürlichen oder künstlichen Realität eingeordnet. Das Grundkonzept für eine Bewertungsskala liegt in der Nutzung dieses erweiterten Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum und die Bewertung der Abstraktion bzw. des natürlichen Realismus des jeweilig genutzten Mediums und der darin liegenden Anwendung.

In Bezug an die Ergebnisse aus der Recherche ergab sich, dass für die technische Abbildung der natürlichen Realität Immersion, Präsenz und Wechselwirkung die wesentlichen Bestandteile sind. Alle drei Faktoren sind somit für eine Bewertung entscheidend. Mit der Annahme, dass die einzelnen Faktoren bewertet und als Zahl ausgedrückt werden können, ergibt sich die mathematische Zusammensetzung der Formel 4.5. Dieser wird im folgendem unter dem Namen Pan-Faktor¹ beschrieben.

$$\text{Pan-Faktor} = \text{Immersion} + \text{Präsenz} + \text{Wechselwirkung} + \Delta\delta \quad (4.5)$$

mit: Maßeinheit := Pan-Punkte (PP)

$\Delta\delta$:= Abweichung

Mit der Formel 4.5 ergibt sich ein Vergleichsfaktor, welcher die Größe des natürlichen Realismus ausdrückt. Die Herausforderung stellen die mathematische Abbildung der einzelnen Summanden dar. Das Konzept dies zu bewerkstelligen, liegt darin, die Einflussfaktoren auf ihre Qualität und Quantität in der

¹ In Anlehnung an die Geschichte von Peter Pan - der Junge, der nie erwachsen wird. Peter Pan kann seine selbstgeschaffenen Welt mittels seiner Fantasie real beeinflussen. Diese erscheinen auch für seine Begleiter natürlich und wahrhaftig. Somit schafft er eine vollständig immersive Abbildung der natürlichen Umgebung in einer virtuellen bzw. künstlichen Welt. Es ist Peter Pan über das natürlich Reale möglich weitere künstliche Aktionen wie z. B. das Fliegen durchzuführen [19].

jeweiligen Anwendung objektiv zu bewerten. Um eine solche Bewertung durchführen zu können, wurden die einzelnen Einflussfaktoren genauer untersucht und wiederum in einzelne beschreibbare und bewertbare Bestandteile eingeteilt. Dies ist wichtig, da die Faktoren Immersion, Präsenz und Wechselwirkung nicht bewertbar beschrieben und definiert sind. Es ergibt sich, dass die Dreiteilung des Pan-Faktors auf dem äußeren Ring zehn weitere Teile im inneren Ring erhält (siehe Abbildung 4-2).

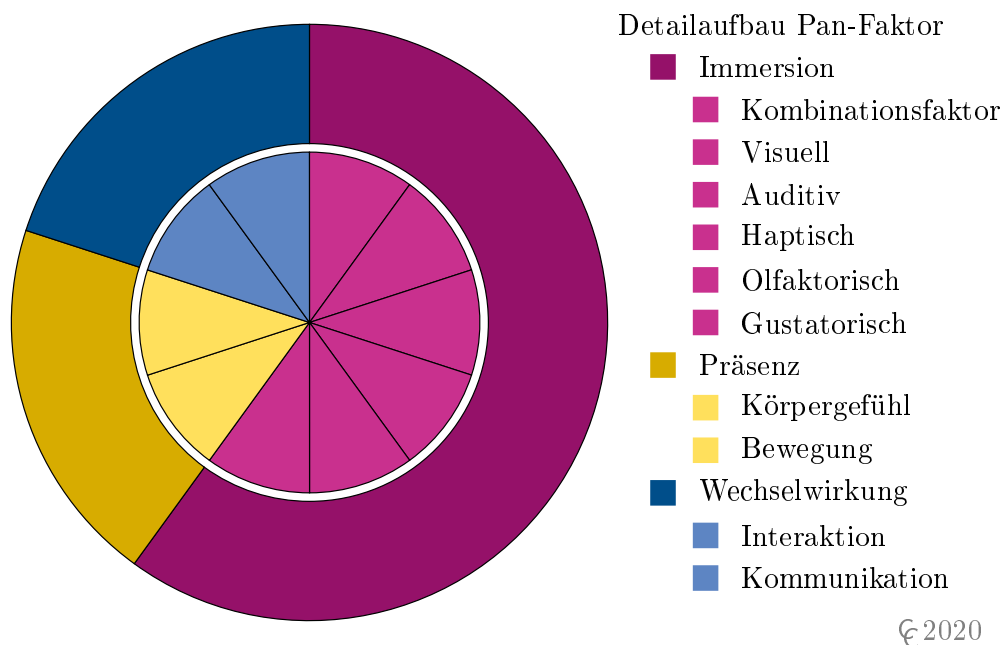


Abbildung 4-2: Aufbau des Pan-Faktors mit den Einflussfaktoren Immersion, Präsenz & Wechselwirkung

4.2.1 Der Einflussfaktor Immersion

Die Immersion beschreibt das „Eintauchen“ in die virtuelle Umgebung (siehe Kapitel 2.1). Die Immersion wird vom Menschen über die Wahrnehmung bestimmt, welche durch das Reizen der Sinne ausgelöst wird. Die menschlichen Sinne umfassen die visuelle, auditive, haptische, olfaktorische und gustatorische Wahrnehmung. Um die Immersion zu bewerten, müssen diese einzelnen Wahrnehmungskomponenten beziffert werden.

Der Anteil Immersion im Pan-Faktor taxiert somit das „Bespielen der Sinne“ über künstliche Abbildungsformen bzw. innerhalb künstlicher Umgebungen. Deshalb wird jede einzelne Sinneswahrnehmung bewertet, aber auch, als sogenannter **Kombinationsfaktor**, die Anzahl der genutzten Sinne festgehalten. Der Kombinationsfaktor gibt zum einen die Anzahl der genutzten Sinne wieder als auch pauschal eine Bewertung durch die Kombination verschiedener Sinne bzw. deren Synergieeffekte. Dass die Sinne unterschiedlichen Einfluss aufeinander haben, wurde in den Unterkapiteln von Kapitel 2.1 erläutert. Dabei konnte herausgearbeitet werden, dass ein Einfluss und eine klare Abhängigkeit untereinander existiert und dadurch Synergieeffekte entstehen. Allerdings ist es bisher noch nicht möglich eine eindeutige Aussage über die Größe der Effekte untereinander festzulegen, weshalb ein pauschaler Kombinationsfaktor festgelegt wird. Dieser entspricht im Konzept des Pan-Faktors die Anzahl der Sinne mit einer doppelten

Wichtung.

Jeder bespielte Sinn wird des Weiteren detaillierter auf die Art und Weise der künstlichen Abbildung sowie Nutzung untersucht und bewertet. Es wird die Qualität und Quantität des Sinnes beziffert. Deshalb kann für die Immersion die Formel 4.6 angesetzt werden. Die Herausforderung der Taxierung stellt die Bewertung von Qualität und Quantität für den Einsatz der jeweiligen Sinne dar.

$$Immersion = (2 * n_{Sinne}) + (V_{ql} + V_{qn}) + (A_{ql} + A_{qn}) + (H_{ql} + H_{qn}) + (O_{ql} + O_{qn}) + (G_{ql} + G_{qn}) \quad (4.6)$$

mit: Maßeinheit := Pan-Punkte (PP)

V := Visuelle Wahrnehmung

A := Auditive Wahrnehmung

H := Haptische Wahrnehmung

O := Olfaktorische Wahrnehmung

G := Gustatorische Wahrnehmung

n := Anzahl

ql := Qualität

qn := Quantität

$$f(x) := \begin{cases} (x_{ql} + x_{qn}) & \text{für } x_{ql} > 0 \wedge x_{qn} > 0 \\ 0 & \text{für } x_{ql} = 0 \vee x_{qn} = 0 \end{cases}$$

Die Quantität beschreibt die Menge bzw. den Anteil der eingesetzten Objekte zur Bespielung des jeweiligen Sinnes. Festgelegt wird, dass die Quantität der Anteile der Objekte mit der höchsten Qualität im Verhältnis zu allen Objekten ist. Dies kann mit der folgenden Formel 4.7 bestimmt werden.

$$\text{Quantität} = \frac{n_{\text{bewertete Objekte}}}{n_{\text{Objekte}}} * 100 \quad (4.7)$$

mit: Maßeinheit := %

n := Anzahl

Wenn also beispielsweise eine Applikation aus einem Gebäudemodell mit 2.704 Bauteilen besteht, von denen allerdings nur 1.967 texturiert sind und in der visuellen Wahrnehmung als höchste Qualität bewertet werden, dann wird die Anzahl 1.967 für die Berechnung der Quantität genutzt. In dem Beispiel wäre somit die Quantität bei einem Anteil von 72,74 %, da nach Formel 4.7 gilt $\frac{1967}{2704} * 100 = 72,74$. Wichtig hierbei ist, dass die Qualitätsunterschiede zwischen den einzelnen Elementen nicht zu groß bzw. grundlegend sind. Ist dies der Fall stört dies die Immersion und hat einen negativen Effekt auf die künstliche Abbildung. Dies kann beispielsweise der Fall sein, wenn in einer Low-Poly-Umgebung ein detailgetreuer und realistisch wirkender Gegenstand platziert wird. Der detaillierte Gegenstand ist zwar der Gegenstand mit der höchsten Qualität, aber stört durch den Qualitätsabstand zum Rest der Applikation die Illusion und damit Immersion. Dies wird mit Hilfe der Formel 4.7 verhindert bzw. berücksichtigt. Die Skala der Quantität beschreibt die Bereiche wenig, einige, viele, sehr viele und vollständig und ist in Tabelle 4-1 detailliert erläutert. Das Konzept sieht die Einteilung des zu bewertenden Anteils in gleichen

Prozentanteilen vor mit Ausnahme der Wertung **vollständig**, welche nur bei einer umfassenden Umsetzung verwendet wird.

Tabelle 4-1: Definition der Quantität im Pan-Faktor

Bewertung	Erläuterung
Keine	Es sind keine Elemente in der bewerteten Qualität umgesetzt. <i>Anteil umgesetzte Elemente: 0 - 1 %</i>
Wenig	Es sind wenige Elemente in der bewerteten Qualität umgesetzt. <i>Anteil umgesetzte Elemente: 1-23 %</i>
Einige	Es sind einige Elemente in der bewerteten Qualität umgesetzt. <i>Anteil umgesetzte Elemente: 24-46 %</i>
Viele	Es sind viele Elemente in der bewerteten Qualität umgesetzt. <i>Anteil umgesetzte Elemente: 47-69 %</i>
Sehr Viele	Es sind sehr viele Elemente in der bewerteten Qualität umgesetzt. <i>Anteil umgesetzte Elemente: 70-92 %</i>
Vollständig	Es sind alle Elemente in der bewerteten Qualität umgesetzt. <i>Anteil umgesetzte Elemente: 93-100 %</i>

Die Qualität wird ebenfalls für alle Faktoren innerhalb des Pan-Faktors in fünf Bereiche eingeteilt. Diese sind die **schematische, einfache, abstrakte, realitätsnahe und reale** Qualität. Diese Einteilung orientiert sich an dem erweiterten Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum (siehe Abbildung 3-2) und dem Vorschlag der Einteilung in symbolische, abstrahierte, indexierte und verstimulare Bereiche [275]. Dabei wurden allerdings die Begriffe so gewählt, dass diese universell für alle Einflussfaktoren des Pan-Faktors genutzt werden können und damit das Ziel zur Einheit erfüllen.

Zu bewerten ist oder sind die digitalen Anteile der Applikation mit der größten Qualität für den jeweiligen Sinn. Beispielweise wird das Objekt mit der ausgeprägtesten Textur, Schattenbildung und mit höchstem Detaillierungsgrad für die Bewertung der Qualität herangezogen. Die zu bewerteten Objekte dürfen dabei durch große Unterschiede zu anderen Objekten keine negativen Auswirkungen auf die Illusion aufweisen. Um die Unterteilung in die verschiedenen Kategorien (einfach, abstrakt, realitätsnah und real) einfach gestalten zu können, müssen diese klar definiert und mit orientierenden Kennwerten gestützt sein. Dies kann im Pan-Faktor gelöst werden indem die Freiheitsgrade (DOF) und der Anwendungsbereich (FOR) verwendet werden. Für den Pan-Faktor ist die nutzende Person und somit der Mensch das Zentrum, weshalb jede Bewertung von diesem ausgeht. Es wird demnach ein Freiheitsgrade gewählt, welcher die Freiheitsgrade des Menschen aufzählt. Für die haptische Wahrnehmung können aufgrund der Größe des Sinnesorgans die 117 Freiheitsgrade von Abbildung 3-4 angesetzt werden. Die Analyse der Hardware zeigte, dass Displays in diesem Bereich wenig bis keine Einschränkungen in den Freiheitsgraden verursachen. Deshalb müssen nicht die vollständigen 117, sondern nur die verein-

fachten 6 genutzt werden. Es ergibt sich, dass die Rotation und Translation des Menschen, in x-, y- und z-Achse - sprich 6 Freiheitsgrade - dem Maximalwert für die visuelle, auditive, olfaktorische und gustatorische Wahrnehmung ist. Die Freiheitsgrade werden in unterschiedlichen Bereichen basierend auf der Hardwareanalyse und somit den technischen Möglichkeiten eingeteilt und als orientierende Kennwerte basierend auf der vorausgegangenen Hardwareanalyse festgelegt.

Ebenfalls ist der Anwendungsbereich für den Nutzenden zu betrachten und kann maximal einen Wert von 100 % erreichen. Diese Kennwerte können klar definiert werden und helfen geeignete Definitionen für die Qualität festzulegen. Der Anwendungsbereich wird im Konzept ähnlich der Quantität gleichmäßig eingeteilt, die Freiheitsgrade entsprechen den technischen Möglichkeiten der Hardwaresysteme und spiegeln das erweiterte Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum wider. Ein Konzept für diese Definitionen abhängig der unterschiedlichen Wahrnehmungsform wurde in Tabelle 4-2, Tabelle 4-3, Tabelle 4-4, Tabelle 4-5 und Tabelle 4-6 ausformuliert und mit Kennwerten zur Orientierung festgehalten. In diesen Tabellen finden sich ebenfalls Beispiele, um ein Verständnis für die jeweilige Qualität entwickeln zu können. Außerdem wird neben den Kennwerten auch in einem kurzen Satz erläutert, was unter dieser Form der Qualität in der jeweiligen Wahrnehmungsart zu verstehen ist.

Tabelle 4-2: Qualitätsdefinition der visuellen Wahrnehmung

Bewertung	Erläuterung
Schematisch	<p>Es ist eine schematische Visualisierung umgesetzt. Schemata sind meist als 2D-Graphik und in technischen bzw. künstlichen Darstellungsformen wie Text, Graphen und Zahlen dargestellt.</p> <p>Kennwerte: FOR $\hat{=}$ 1-23 %; DOF $\hat{=}$ 0-2; <i>Beispiel: Handbuch, 2D-Pläne z. B. (Grundriss, Schnitte)</i></p>
Einfach	<p>Es ist eine einfache Visualisierung umgesetzt. 2D- und 3D-Darstellungen werden verwendet und mit einfachen Farben oder Formen z. B. Bounding-Boxen der Sachverhalt angezeigt. Oft im Zusammenhang mit Texten oder Diagramme werden 3D-Inhalte erläutert.</p> <p>Kennwerte: FOR $\hat{=}$ 24-46 %; DOF $\hat{=}$ 1-3; <i>Beispiel: Einfache 3D-Gebäudemodelle</i></p>
Abstrakt	<p>Es ist eine abstrakte Visualisierung umgesetzt. Die Darstellung ist auf wesentliche Bestandteile abstrahiert und lässt die 3D-Formen deutlich erkennen. Die Darstellung ist vollständig, besteht allerdings aus einfachen abstrahierten Modellen. Einfache Texturen, Schattenbildung und Reflexion sind umgesetzt.</p> <p>Kennwerte: FOR $\hat{=}$ 47-69 %; DOF $\hat{=}$ 2-5; <i>Beispiel: 3D-Gebäudemodelle, Low-Poly Umgebungsmodelle</i></p>

Bewertung	Erläuterung
Realitätsnah	<p>Es ist eine realitätsnahe Visualisierung umgesetzt. Die Darstellung nähert sich der Realität in Textur, Schattenbildung und Reflexionen. Der Unterschied von virtuellen zu realen Objekten ist nur in Teilen oder im Fokus zu unterscheiden.</p> <p>Kennwerte: FOR $\hat{=}$ 70-92 %; DOF $\hat{=}$ 3-6;</p> <p>Beispiel: Detaillierte 3D-Gebäudemodelle</p>
Real	<p>Es ist eine reale Visualisierung umgesetzt. Die Darstellung entspricht der Realität in Textur, Schattenbildung und Reflexionen. Der Unterschied von virtuellen zu realen Objekten ist nicht zu unterscheiden.</p> <p>Kennwerte: FOR $\hat{=}$ 93-100 %; DOF $\hat{=}$ 6;</p> <p>Beispiel: Hochauflösende 3D-Gebäudemodelle</p>

Tabelle 4-3: Qualitätsdefinition der auditiven Wahrnehmung

Bewertung	Erläuterung
Schematisch	<p>Es ist eine schematische Form von Ton umgesetzt. Es wird eine ungerichtete kurze Tonspur oder Signal wiedergegeben.</p> <p>Kennwerte: FOR $\hat{=}$ 1-23 %; DOF $\hat{=}$ 0;</p> <p>Beispiel: Auditives Feedback, Benachrichtigungs- oder Signalton</p>
Einfach	<p>Es ist eine einfache Form von Sound umgesetzt. Es wird eine Tonspur wiedergegeben, die keinen räumlichen Bezug oder besondere Klangqualität verfügt.</p> <p>Kennwerte: FOR $\hat{=}$ 24-46 %; DOF $\hat{=}$ 0-3;</p> <p>Beispiel: Ungerichtetes Gespräch, Musik, Erklärungstonspur</p>
Abstrakt	<p>Es ist eine abstrakte Form von Sound umgesetzt. Die Klangqualität wird durch Einführung von Effekten verstärkt und die Tonquelle kann einer Richtung grob zugeordnet werden. Der Sound kann bereits aus mehreren Tonspuren bestehen. Entfernungen zur Soundquelle sind hörbar.</p> <p>Kennwerte: FOR $\hat{=}$ 47-69 %; DOF $\hat{=}$ 3-5;</p> <p>Beispiel: Gerichtetes Gespräch, Objektbezogene Laute und Töne</p>
Realitätsnah	<p>Es ist eine realitätsnahe Form von Sound umgesetzt. Die Klangqualität wird durch die Nutzung von mehreren Tonspuren, Effekten natürlicher. Der Sound kann unterschiedlichen Richtungen zugeordnet werden. Interferenzen und Entfernungen zur Soundquelle sind wahrnehmbar.</p> <p>Kennwerte: FOR $\hat{=}$ 70-92 %; DOF $\hat{=}$ 3-6;</p> <p>Beispiel: Umfassender (360°-) Sound, Ausgerichtete objektbezogene Soundquellen</p>

Bewertung	Erläuterung
Real	<p>Es ist ein realistische Sound und Klangqualität umgesetzt. Richtung, Lautstärke, Qualität und Soundverhalten sind von der natürlichen Realität nicht mehr zu unterscheiden.</p> <p>Kennwerte: FOR $\hat{=}$ 93-100 %; DOF $\hat{=}$ 6;</p> <p>Beispiel: Natürliche Soundwiedergabe</p>

Tabelle 4-4: Qualitätsdefinition der haptischen Wahrnehmung

Bewertung	Erläuterung
Schematisch	<p>Es ist eine schematische Haptik umgesetzt. Es gibt keine Repräsentation der Haptik, aber durch die Nutzung einer Hardwarekomponente kann in der Digitale Realität Objekte oder Umgebung berührt, verändert, ausgewählt u.ä. werden.</p> <p>Kennwerte: FOR $\hat{=}$ 1-23 %; DOF $\hat{=}$ 0-14;</p> <p>Beispiel: Maus-Klickereignis, Controller-Klickereignis, Joystick-Klickereignis</p>
Einfach	<p>Es ist eine einfache Haptik umgesetzt. Objekte und Umgebung werden über ein einfaches haptisches Feedback wahrnehmbar gestaltet.</p> <p>Kennwerte: FOR $\hat{=}$ 24-46 %; DOF $\hat{=}$ 15-39;</p> <p>Beispiel: Ungerichtete Vibration</p>
Abstrakt	<p>Es ist eine abstrakte Haptik umgesetzt. Objekte und Umgebung werden über unterschiedliche Einstellungen oder Repräsentationen haptisch dargestellt. Es existiert ein klarer Unterschied zwischen einzelnen Objekten.</p> <p>Kennwerte: FOR $\hat{=}$ 47-69 %; DOF $\hat{=}$ 40-61;</p> <p>Beispiel: Gerichtete Vibration, Wärme-, Wind- oder Feuchtigkeitselemente</p>
Realitätsnah	<p>Es ist eine realitätsnahe Haptik umgesetzt. Einzelne Objekte fühlen sich in Form, Temperatur und/oder Struktur an wie das natürliche Objekt. Eventuell können Kräfte wie das Gewicht des Objekts spürbar und umgesetzt sein.</p> <p>Kennwerte: FOR $\hat{=}$ 70-92 %; DOF $\hat{=}$ 62-100;</p> <p>Beispiel: Force-Feedback, Elektrostimulation, Wärme- Wind- oder Feuchtigkeitselemente</p>
Real	<p>Es ist eine reale Haptik umgesetzt. Objekte und Umgebung und fühlen sich in Form, Gewicht, Temperatur und Struktur an wie das natürliche Objekt. Vom Objekt ausgehende Kräfte wie das Gewicht sind real spürbar und umgesetzt.</p> <p>Kennwerte: FOR $\hat{=}$ 93-100 %; DOF $\hat{=}$ 100-117;</p> <p>Beispiel: Natürliche Objekte</p>

Tabelle 4-5: Qualitätsdefinition der olfaktorischen Wahrnehmung

Bewertung	Erläuterung
Schematisch	<p>Die olfaktorische Umsetzung ist schematisch. Der Raum in der die Anwendung stattfindet wird mit Duft- oder Aromastoffen versetzt, um ein bestimmtes Ambiente zu schaffen.</p> <p>Kennwerte: FOR $\hat{=}$ 1-23 %; DOF $\hat{=}$ 0-2;</p> <p>Beispiel: Rauch- und Brandgeruch</p>
Einfach	<p>Die olfaktorische Umsetzung ist einfach. Ausgewählte Gerüche werden im Laufe der Anwendung objektbezogen verursacht und verbreitet.</p> <p>Kennwerte: FOR $\hat{=}$ 24-46 %; DOF $\hat{=}$ 1-3;</p> <p>Beispiel: Gerichteter Rauch- und Brandgeruch, Raumabhängige Duftnote</p>
Abstrakt	<p>Die olfaktorische Umsetzung ist abstrakt. Bestimmte Aromen und Düfte werden abhängig von Abläufen, Geschehnissen, Objekten oder virtuellen Umgebungen zielgerichtet und zeitgesteuert verströmt.</p> <p>Kennwerte: FOR $\hat{=}$ 47-69 %; DOF $\hat{=}$ 2-5;</p> <p>Beispiel: Duftmischungen</p>
Realitätsnah	<p>Die olfaktorische Umsetzung ist realitätsnahe. Objekte und Umgebung verströmen zielgerichtet, intensiv oder zu bestimmten Zeitpunkten ortsabhängig einen Duft. Es findet eine Überlagerung und das Ein- und Ausblenden von Gerüchen statt.</p> <p>Kennwerte: FOR $\hat{=}$ 70-92 %; DOF $\hat{=}$ 3-6;</p> <p>Beispiel: Dynamische Duftverbreitung</p>
Real	<p>Die olfaktorische Umsetzung ist reale. Die Mischung, Verbreitung, Intensität und Dauer von Düften sind dynamisch umgesetzt und von der natürlichen Realität nicht zu unterscheiden.</p> <p>Kennwerte: FOR $\hat{=}$ 93-100 %; DOF $\hat{=}$ 6;</p> <p>Beispiel: Reale Duftmischungen</p>

Tabelle 4-6: Qualitätsdefinition der gustatorischen Wahrnehmung

Bewertung	Erläuterung
Schematisch	<p>Die gustatorische Umsetzung ist schematisch. Der Geschmack wird durch Geruch oder durch einen Ersatzstoff wie Flüssigkeit ersetzt.</p> <p>Kennwerte: FOR $\hat{=}$ 1-23 %; DOF $\hat{=}$ 0-6;</p> <p>Beispiel: Trinkschlauch mit Geschmacksflüssigkeit</p>

Bewertung	Erläuterung
Einfach	Die gustatorische Umsetzung ist einfach . Objekte und Umgebung schmecken in einer Geschmacksrichtung zielgerichtet und für eine definierte Dauer. Kennwerte: $FOR \hat{=} 24-46 \%$; $DOF \hat{=} 0-6$; <i>Beispiel: Süß, Sauer, Salzig, Bitter, Würzig oder Fettig</i>
Abstrakt	Die gustatorische Umsetzung ist abstrakt . Objekte und Umgebung schmecken in zwei Geschmacksrichtungen zielgerichtet oder für die reale Dauer. Kennwerte: $FOR \hat{=} 47-69 \%$; $DOF \hat{=} 1-6$; <i>Beispiel: Süß, Sauer, Salzig, Bitter, Würzig und/oder Fettig</i>
Realitätsnah	Die gustatorische Umsetzung ist realitätsnahe . Objekte und Umgebung schmecken in mindestens drei Geschmacksrichtungen zielgerichtet oder für die reale Dauer. Kennwerte: $FOR \hat{=} 70-92 \%$; $DOF \hat{=} 3-6$; <i>Beispiel: Süß, Sauer, Salzig, Bitter, Würzig und/oder Fettig</i>
Real	Die gustatorische Umsetzung ist reale . Objekte und Umgebung schmecken in allen Geschmacksrichtungen zielgerichtet und für die reale Dauer. Kennwerte: $FOR \hat{=} 93-100 \%$; $DOF \hat{=} 6$; <i>Beispiel: Süß, Sauer, Salzig, Bitter, Würzig und Fettig</i>

Einfach	Die gustatorische Umsetzung ist einfach . Objekte und Umgebung schmecken in einer Geschmacksrichtung zielgerichtet und für eine definierte Dauer. Kennwerte: $FOR \hat{=} 24-46 \%$; $DOF \hat{=} 0-6$; <i>Beispiel: Süß, Sauer, Salzig, Bitter, Würzig oder Fettig</i>
Abstrakt	Die gustatorische Umsetzung ist abstrakt . Objekte und Umgebung schmecken in zwei Geschmacksrichtungen zielgerichtet oder für die reale Dauer. Kennwerte: $FOR \hat{=} 47-69 \%$; $DOF \hat{=} 1-6$; <i>Beispiel: Süß, Sauer, Salzig, Bitter, Würzig und/oder Fettig</i>
Realitätsnah	Die gustatorische Umsetzung ist realitätsnahe . Objekte und Umgebung schmecken in mindestens drei Geschmacksrichtungen zielgerichtet oder für die reale Dauer. Kennwerte: $FOR \hat{=} 70-92 \%$; $DOF \hat{=} 3-6$; <i>Beispiel: Süß, Sauer, Salzig, Bitter, Würzig und/oder Fettig</i>
Real	Die gustatorische Umsetzung ist reale . Objekte und Umgebung schmecken in allen Geschmacksrichtungen zielgerichtet und für die reale Dauer. Kennwerte: $FOR \hat{=} 93-100 \%$; $DOF \hat{=} 6$; <i>Beispiel: Süß, Sauer, Salzig, Bitter, Würzig und Fettig</i>

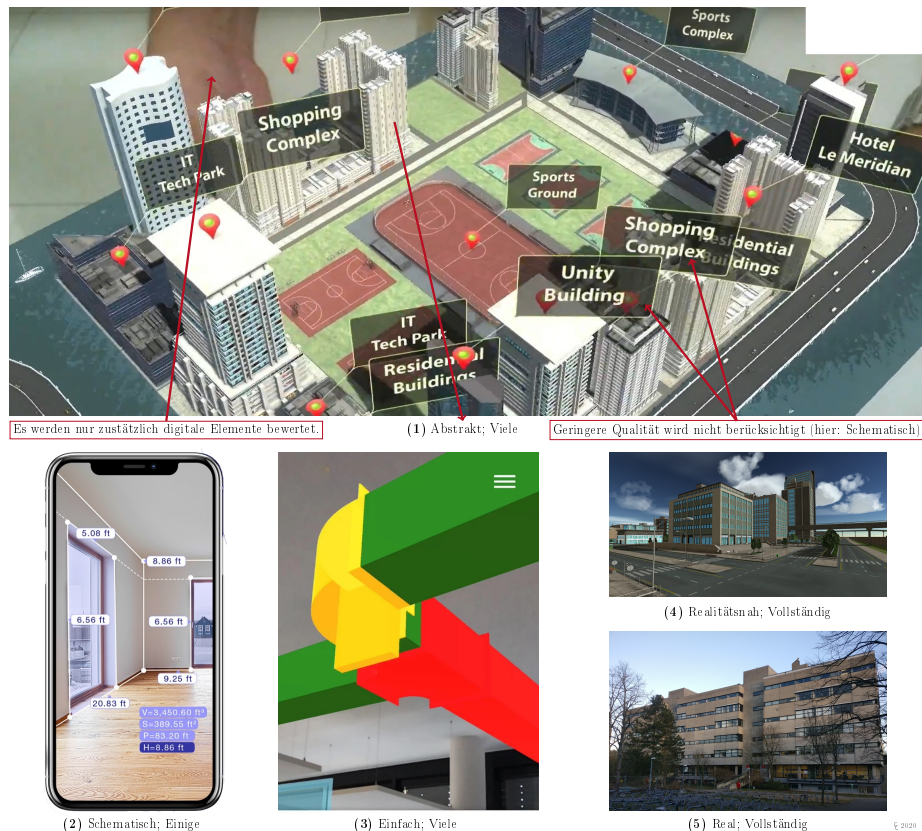


Abbildung 4-3: Beispiel zur Bewertung der visuellen Qualität anhand des Pan-Faktor (Eigene Darstellung in Anlehnung an [81], [123], [196], [244])

Eine Bewertung kann anhand der hier definierten Tabellen durchgeführt werden und somit Qualitäten der Wahrnehmungsformen unterschiedlicher Anwendungen aufgrund ihrer Produktbeschreibungen, Demonstrationen, Videos, u.ä. bewertet werden. Beispielsweise wird die visuelle Qualität wie in Abbildung 4-3 mit Hilfe der Tabelle 4-2 eingeteilt.

4.2.2 Der Einflussfaktor Präsenz

Die Immersion beschreibt den Einsatz und die Synergieeffekte der Sinne, die es dem Nutzenden ermöglichen in die immersive virtuelle Umgebung einzutauchen. Die Präsenz knüpft hieran an und beschreibt das Gefühl wirklich dort bzw. darin zu sein. Aktuell wird die Bewertung und Ermittlung der Präsenz innerhalb der Präsenzforschung über Fragebögen und der subjektiven Aussage der Teilnehmer ermittelt. Dies ist für eine möglichst objektive Bewertungsskala, wie sie der Pan-Faktor darstellt, unzureichend. Für eine objektive Einteilung ist es nötig die Präsenz in bewertbare Faktoren einzuteilen. Die Recherche in Kapitel 2.3 hat ergeben, dass das Gefühl der Präsenz stark von der Immersion, dem Inhalt, dem Körpergefühl und der Bewegung in der virtuellen Umgebung abhängt. Da die Immersion als eigener Einflussfaktor in den Pan-Faktor aufgenommen wird, wird dieser hier vernachlässigt.

Der Inhalt einer Applikation beschreibt die Führung durch das Geschehnis, den Ablauf des Gezeigten bzw. Erlebten und die virtuelle Umgebung, in der sich die anwendende Person befindet. Die nutzende Person muss den Inhalt körperlich, bewusst und unterbewusst annehmen und akzeptieren, damit das Gefühl von Präsenz entsteht. Es ist nicht ausschlaggebend, dass alle Sinne angesprochen werden, dennoch unterstützt dies zusätzlich den Effekt der Akzeptanz. Die Bewertung des Inhalts in dessen Form und Umsetzung stellt eine schwierige Herausforderung dar, da diese auf subjektive Parameter des Anwendenden zurückzuführen sind. Es ist davon auszugehen, dass Ingenieure und Ingenieurinnen eine hohe Affinität zu diesem Inhalt besitzen. Dies ermöglicht die klare Aussage den Inhalt im Bereich der Präsenz für den Pan-Faktor zu vernachlässigen. Das Körpergefühl und die Bewegung dagegen werden beziffert.

Das Körpergefühl stellt die Empfindung zum eigenen Körper dar. Hier ist es wichtig in wie weit die nutzende Person sich innerhalb der Applikation selbst erfahren kann. Das Erfahren hängt stark mit der Repräsentation des Körpers in der virtuellen Umgebung und der Interaktion mit der virtuellen Umgebung zusammen. Die Interaktion wird gesondert im Bereich der Wechselwirkung (siehe Kapitel 4.2.3) betrachtet und kann damit hier differenziert werden. Die Repräsentation spiegelt das virtuelle Abbild des Körpers in der künstlichen Umgebung wider. So ist dies in einer 2D-Anwendung meist die Maus, welche als Pfeil dargestellt, die Anwesenheit des Nutzenden symbolisiert. Der Körper ist eine reine Abstraktion innerhalb einer 2D-Koordinate. In einer VR-Anwendung dagegen werden meist Hände oder sogar ganze Körper dargestellt. Diese können verbunden mit Haptik und Interaktion zu spürbaren Körpern werden, welches die Erfahrung steigert. Umso mehr die nutzende Person den eigenen Körper sieht, spürt, u.ä. spricht wahrnimmt, desto größer ist das Körpergefühl. Es stehen dem Menschen 117 Freiheitsgrade zur Verfügung und können bewertet bzw. beziffert werden. Dabei ist zu beachten, dass das Körpergefühl und damit das Gefühl von Präsenz erheblich gestört werden kann, wenn das künstliche Abbild nicht den natürlichen Gesetzen der Realität folgt. Das Körpergefühl ist sofort zerstört und die Präsenz verschwindet. Präsenz ist absolut und somit entweder vorhanden oder nicht. Im Pan-Faktor werden somit die Qualität und Quantität der Repräsentation des Körpers und der Abweichung mit der natürlichen Realität bewertet. Die Quantität spiegelt dabei den Anteil des Körpers wider, welcher gezeigt wird. Dies kann wenig,

einiges, viel, sehr viel und vollständig sein (siehe Tabelle 4-1). Dabei wird die Quantität der Körperteile beziffert, welche als Qualität bemessen werden. Die Qualität ist schematisch, einfach, abstrakt, realitätsnah oder real. Die Unterscheidung tritt darüber auf, wie viel vom Körper in der virtuellen Umgebung wahrgenommen und erfahrbar gestaltet wird. Beispielsweise wird die reale Rotation des Körpers in der Anwendung übersetzt oder nicht. Eine detaillierte Beschreibung und Beispiele finden sich in Tabelle 4-7.

Tabelle 4-7: Qualitätsdefinition des Körpergefühls

Bewertung	Erläuterung
Schematisch	<p>Das Körpergefühl ist schematisch umgesetzt. Das Raumgefühl entsteht durch die 3D-Darstellung und es werden nur einzelne Bewegungen in die virtuelle Welt übersetzt.</p> <p>Kennwerte: $FOR \hat{=} 1-23 \%$; $DOF \hat{=} 2-5$;</p> <p><i>Beispiel: Bildveränderung durch Joystick oder Kopfbewegung</i></p>
Einfach	<p>Das Körpergefühl ist einfach umgesetzt. Das Sichtfeld wird an die Bewegung des Nutzers angepasst. Eine Hand zur Interaktion kann über eine Abstraktion (z.B. Controller, Avatar) abgebildet sein.</p> <p>Kennwerte: $FOR \hat{=} 24-46 \%$; $DOF \hat{=} 3-12$;</p> <p><i>Beispiel: Abbildung der Kopfbewegung und eines realen Controllers in der virtuellen Umgebung</i></p>
Abstrakt	<p>Das Körpergefühl ist abstrakt umgesetzt. Mindestens ein Gliedmaß wird über Abstraktionen dargestellt und bewegt sich identisch zur natürlichen Realität.</p> <p>Kennwerte: $FOR \hat{=} 47-69 \%$; $DOF \hat{=} 6-26$;</p> <p><i>Beispiel: Abbildung von Controllern an beiden Händen und damit eine Visualisierung der Extremitäten</i></p>
Realitätsnah	<p>Das Körpergefühl ist realitätsnah umgesetzt. Der Körper ist teilweise sichtbar, kann wirklichkeitsgetreu bewegt werden und reagiert in Teilen mit der Umgebung. Feinheiten wie Fingerbewegungen können abgebildet sein.</p> <p>Kennwerte: $FOR \hat{=} 70-92 \%$; $DOF \hat{=} 18-107$;</p> <p><i>Beispiel: Reale Finger und/oder Körperbewegung wird virtuell abgebildet</i></p>
Real	<p>Das Körpergefühl ist realistisch umgesetzt. Der Körper ist vollständig sichtbar, kann natürlich bewegt werden und reagiert mit der Umgebung. Feinheiten wie Finger- oder Arm- und Beinbewegungen sind abgebildet.</p> <p>Kennwerte: $FOR \hat{=} 93-100 \%$; $DOF \hat{=} 107-117$;</p> <p><i>Beispiel: Natürliche Bewegung und Abbildung in der virtuellen Umgebung</i></p>

Der zweite Faktor zur Bewertung der Präsenz ist die Bewegung des Nutzenden in der virtuellen Umgebung. Die Positionsänderung des Körpers oder einzelner Körperteile kann dargestellt als eine Mausbewe-

gung oder als das Laufen in einer VR-Anwendung umgesetzt sein. Es gibt dabei wesentliche Unterschiede wie natürlich die Fortbewegung stattfindet und welche Grenzen dem Anwendenden obliegen. Es ist also zu bewerten, wie frei sich die nutzende Person im virtuellen Raum bewegen kann und wie viel sich die natürliche Bewegung des Körpers auf die virtuelle Umgebung auswirkt. Auch ist der Anteil der eingesetzten Körperteile ein wichtiger Aspekt, der in der Qualität bewertet werden muss. Ähnlich wie das Körpergefühl wird deshalb die Bewegung in ihrer Qualität mit der vorherig beschriebenen Einteilung beziffert. Die Qualität der Bewegung wird in ihrer Quantität ebenfalls taxiert. Beides ist in der Tabelle 4-8 genau definiert und mit Beispielen erläutert. Mit den beiden Einflussfaktoren Körpergefühl und Bewegung ergibt sich für den Pan-Faktor eine Präsenz wie sie in der folgenden Formel 4.8 definiert ist.

$$Präsenz = (K_{ql} + K_{qn}) + (B_{ql} + B_{qn}) \quad (4.8)$$

mit: Maßeinheit := Pan-Punkte (PP)

K := Körpergefühl

B := Bewegung

ql := Qualität

qn := Quantität

$$f(x) := \begin{cases} (x_{ql} + x_{qn}) & \text{für } x_{ql} > 0 \wedge x_{qn} > 0 \\ 0 & \text{für } x_{ql} = 0 \vee x_{qn} = 0 \end{cases}$$

Tabelle 4-8: Qualitätsdefinition der Bewegung

Bewertung	Erläuterung
Schematisch	Die Bewegung ist schematisch umgesetzt. Die Kinetik gestaltet sich passiv. Meist ist diese geführt und vordefiniert. Kennwerte: FOR $\hat{=}$ 1-23 %; DOF $\hat{=}$ 0-3; <i>Beispiel: Bewegung der Umgebung, Szenen-basierte Kameraführung</i>
Einfach	Die Bewegung ist einfach umgesetzt. Mit Hilfe einfacher Interaktionen kann die Position verändert werden. Kennwerte: FOR $\hat{=}$ 24-46 %; DOF $\hat{=}$ 1-3; <i>Beispiel: Steuerung durch Maus und Tastatur, Betätigen einer Schaltfläche</i>
Abstrakt	Die Bewegung ist abstrakt umgesetzt. Der Körper kann vor Ort frei bewegt werden, zur Positionsveränderung wird auf abstrakte Möglichkeiten zurückgegriffen. Kennwerte: FOR $\hat{=}$ 47-69 %; DOF $\hat{=}$ 2-5; <i>Beispiel: Teleport, Szenen-basierte Positionsänderung</i>

Bewertung	Erläuterung
Realitätsnah	<p>Die Bewegung ist realitätsnah umgesetzt. Der Körper kann vor Ort frei bewegt werden und zur Positionsveränderung kann der Körper natürlich unter bestimmten Grenzen fortbewegen werden.</p> <p>Kennwerte: $FOR \hat{=} 70-92 \%$; $DOF \hat{=} 3-6$;</p> <p><i>Beispiel: Bewegung auf begrenzter Fläche, Motion-Plattform</i></p>
Real	<p>Die Bewegung ist realistisch umgesetzt. Keine Grenzen limitieren die Positionsänderungen oder Schränken die Bewegung ein.</p> <p>Kennwerte: $FOR \hat{=} 93-100 \%$; $DOF \hat{=} 117$;</p> <p><i>Beispiel: Bewegung in einer vollkommen freien Motion-Plattform, Natürliche Bewegung</i></p>

4.2.3 Der Einflussfaktor Wechselwirkung

Der letzte Einflussfaktor des Pan-Faktors ist die **Wechselwirkung** (siehe Abbildung 4-2). Diese beschreibt zum einen die passive und aktive Interaktion der Anwendung der Digitalen Realität bzw. virtuellen Umgebung mit dem Anwendenden und die Kommunikation mit anderen realen und virtuellen Teilnehmenden bzw. Avataren oder Agenten. Eine passive Interaktion ist die Wechselwirkung der Umgebung mit dem Nutzenden wie beispielsweise Wind oder Regen. Es kann aber auch das Feedback eines Gegenstandes sein, welcher auf aktive Interaktion reagiert z. B. Hitze beim Berühren von Feuer. Die anwendende Person kann meist die passive Interaktion nicht beeinflussen und nur durch Positionsänderung die Wechselwirkung verändern. Dagegen kann die nutzende Person bei der aktiven Interaktion selbst bestimmen wie diese mit einem Gegenstand umgeht oder was diese damit macht z. B. Anfassen, Werfen, Greifen, u.ä. Bei der aktiven Wechselwirkung ist die Art und Weise wie die Interaktion erfolgt entscheidend. Dies kann z. B. ein Mausklick-Event sein, das Betätigen eines Buttons auf dem Hand-Controller oder das tatsächliche Greifen mit der Hand. Wie abstrakt und unterschiedlich die Umsetzung dieser Interaktion zur natürlichen Realität ist, ist innerhalb des Einflussfaktors anhand der Qualität zu bewerten. Wie viel Interaktionsmöglichkeiten in der bewerteten Qualität vorhanden ist, wird anschließend in der Quantität beziffert. Eine genaue Definition der einzelnen Bewertungsschritte und die Erläuterung in Form von Beispielen finden sich in der Tabelle 4-9.

Tabelle 4-9: Qualitätsdefinition der Interaktion

Bewertung	Erläuterung
Schematisch	<p>Die Interaktion ist schematisch umgesetzt. Durch einfache Methoden können Objekte aktiviert oder mit der Anwendung interagiert werden.</p> <p>Kennwerte: FOR $\hat{=}$ 1-23 %; DOF $\hat{=}$ 1-2;</p> <p>Beispiel: Maus-Klickereignis, Controller-Klickereignis, Joystick-Klickereignis</p>
Einfach	<p>Die Interaktion ist einfach umgesetzt. Objekte und Umgebung sind so gestaltet, dass mit Ihnen in einfacher Form und nur in Teilen Ihrer Funktion entsprechen interagiert werden kann.</p> <p>Kennwerte: FOR $\hat{=}$ 24-46 %; DOF $\hat{=}$ 1-3;</p> <p>Beispiel: Hochheben von Objekten durch virtuelle oder reale Bewegungen</p>
Abstrakt	<p>Die Interaktion ist abstrakt umgesetzt. Objekte und Umgebung sind so gestaltet, dass mit Ihnen teilweise intuitiv interagiert werden kann.</p> <p>Kennwerte: FOR $\hat{=}$ 47-69 %; DOF $\hat{=}$ 3-6;</p> <p>Beispiel: Einfaches Benutzen und Hochheben von Objekten</p>
Realitätsnah	<p>Die Interaktionen sind in Ihrer Art und Weise, sowie den Möglichkeiten realitätsnah umgesetzt. Objekte können angefasst, bewegt und mit Ihnen Prozesse, Abläufe u.ä. durchgeführt werden. Dabei können die Objekte als Modelle oder reale Objekte vorliegen.</p> <p>Kennwerte: FOR $\hat{=}$ 70-92 %; DOF $\hat{=}$ 4-6;</p> <p>Beispiel: Natürliches Objekt in einer virtuellen Umgebung, Reale Interaktionsmöglichkeiten bei virtuellen Objekten</p>
Real	<p>Die Interaktionen sind in ihrer Art und Weise, sowie den Möglichkeiten real umgesetzt.</p> <p>Kennwerte: FOR $\hat{=}$ 93-100 %; DOF $\hat{=}$ 6;</p> <p>Beispiel: Natürliche Interaktion</p>

Eine andere Form der Wechselwirkung ist die Kommunikation. Für den Pan-Faktor ist dies die Kommunikation mit natürlichen oder künstlichen Personen in der natürlichen oder künstlichen Realität. Es stellt sich demnach die Frage, in welcher Form sich die nutzende Person mit der Umgebung und/oder anderen Teilnehmenden verständigen kann. Dies kann durch eine schriftliche, mündliche oder gestikulierende Form z. B. Chat, Telefonieren, Bildschirmübertragung u.ä. sowie eine Bildunterstützte Technologie in 2D oder 3D z. B. Videotelefonie, Avatar-gestützte Kommunikation umgesetzt sein. Neben dieser aktiven Kommunikation ist die passive Kommunikation z. B. durch Mimik und Gestik zu berücksichtigen und steigert den Pan-Faktor im Bereich der Wechselwirkung. In der Qualität wird die Nähe zur natürlichen Realität und somit intuitive Kommunikation bewertet. Die Bewertung erfolgt erneut in den Bereichen schematische, einfache, abstrakte, realitätsnahe und reale Qualität (siehe Tabelle 4-10). Ob diese Form der Kommunikation für die gesamte Applikation oder nur einen Anteil davon genutzt wird, wird durch

die Quantität in den Bereichen wenig, einige, viele, sehr viele und vollständig taxiert (siehe Tabelle 4-1). Um eine objektive Beurteilung zu ermöglichen findet sich auch hier in Tabelle 4-10 genaue Definitionen für die Bereiche und Beispiele.

Mit den Einflussfaktoren von Interaktion und Kommunikation im Bereich der Wechselwirkungen ergibt sich die folgende Formel 4.9.

$$\text{Wechselwirkung} = (I_{ql} + I_{qn}) + (KO_{ql} + KO_{qn}) \quad (4.9)$$

mit: Maßeinheit := Pan-Punkte (PP)

I := Interaktion

KO := Kommunikation

ql := Qualität

qn := Quantität

$$f(x) := \begin{cases} (x_{ql} + x_{qn}) & \text{für } x_{ql} > 0 \wedge x_{qn} > 0 \\ 0 & \text{für } x_{ql} = 0 \vee x_{qn} = 0 \end{cases}$$

Tabelle 4-10: Qualitätsdefinition der Kommunikation

Bewertung	Erläuterung
Schematisch	<p>Die Kommunikation ist schematisch umgesetzt. Über textbasierte Verfahren oder über Methoden wie Markieren kann zwischen unterschiedlichen Parteien Informationen ausgetauscht werden.</p> <p>Kennwerte: FOR $\hat{=}$ 1-23 %; DOF $\hat{=}$ 1-2;</p> <p>Beispiel: Duplizierter Bildschirm, Markierungen, Chat</p>
Einfach	<p>Die Kommunikation ist einfach umgesetzt. Über sprachbasierte Verfahren oder über Methoden wie Markieren kann zwischen unterschiedlichen Parteien Informationen ausgetauscht werden.</p> <p>Kennwerte: FOR $\hat{=}$ 24-46 %; DOF $\hat{=}$ 1-3;</p> <p>Beispiel: Telefonie, Bildschirmübertragung</p>
Abstrakt	<p>Die Kommunikation ist abstrakt umgesetzt. Über sprachbasierte Verfahren unterstützt mit der Anzeige von Avataren oder digitalen Abbildungen kann zwischen unterschiedlichen Parteien Informationen ausgetauscht bzw. Bewegungen angezeigt werden.</p> <p>Kennwerte: FOR $\hat{=}$ 47-69 %; DOF $\hat{=}$ 3-6;</p> <p>Beispiel: Videotelefonie, Social-VR</p>

Bewertung	Erläuterung
-----------	-------------

Realitätsnah	<p>Die Kommunikation realitätsnah umgesetzt. Über sprachbasierte Verfahren unterstützt mit der Anzeige von realen Avataren mit Mimik kann zwischen unterschiedlichen Parteien Informationen ausgetauscht bzw. Bewegungen z. B. Zeigen angezeigt werden.</p> <p>Kennwerte: FOR $\hat{=}$ 70-92 %; DOF $\hat{=}$ 4-6;</p> <p>Beispiel: Avatar oder natürliches Abbild mit Mimik und Gestik</p>
Real	<p>Die Kommunikation ist in ihrer Art und Weise, sowie den Möglichkeiten real umgesetzt. Alle Parteien sehen sich und können sich natürlich unterhalten.</p> <p>Kennwerte: FOR $\hat{=}$ 93-100 %; DOF $\hat{=}$ 6;</p> <p>Beispiel: Natürliche Kommunikation</p>

4.2.4 Die Abweichung als negativer Faktor

Wie bereits in den Abschnitten zuvor erwähnt und in Kapitel 2.1 ausführlich erläutert, können durch technische Mängel oder Unwissenheit Situationen entstehen, welche die Präsenz, Immersion und Wechselwirkung signifikant stören. In allen drei zuvor beschriebenen Einflussfaktoren können Effekte auftreten, welche zur Folge haben, dass die Illusion gestört oder sogar zerstört und das Gefühl der Präsenz schlagartig aufgehoben wird. Diese können zum einen unabhängig von der Anwendung auftreten, wenn z. B. ein Kabel während des Betriebs gezogen wird und somit Bilder stehen bleiben bzw. verschwinden. Diese generellen Probleme sollen allerdings vernachlässigt und nicht betrachtet werden. Andererseits gibt es technische und virtuelle Komponenten oder Algorithmen, die wiederholt Fehler erzeugen. Diese müssen im Pan-Faktor berücksichtigt werden. Im schlimmsten Fall kann durch die Störung Cybersickness verursacht werden (siehe Kapitel 2.3.5). Die Abweichung als negativer Faktor berücksichtigt diesen Umstand. Mit diesem zusätzlichen Faktor sollen Unregelmäßigkeiten in der Anwendung wie auch der falsche Einsatz von speziellen Techniken berücksichtigt und negativ gewertet werden. Die Gründe für eine Abweichung $\Delta\delta$ sind im Folgenden erläutert.

Im Bereich der Immersion können Diskrepanzen zwischen einzelnen Objekten oder der Umgebung zu einem Verlust der Präsenz führen. Diese können bei der visuellen Wahrnehmung grobe Unregelmäßigkeiten in der graphischen Darstellung sein. Beispielsweise enthält die Applikation Objekte verschiedener Detailstufen (siehe z. B. Abbildung 2-2), sind Schattenbildungen oder Reflexionen unlogisch zueinander oder werden Objekte nicht vollständig bzw. richtig dargestellt. Es gilt das Prinzip, dass eine einheitliche, wenn auch einfache Darstellung sinnvoller ist. Mit Betrachtung dieser Unregelmäßigkeit soll unter anderem auch verhindert werden, dass durch die Umsetzung eines detailgetreuen Objekts in einer ansonsten Low-Poly-Umgebung der Pan-Faktor künstlich maximiert wird.

Im Bereich der auditiven Wahrnehmung kann eine solche Abweichung durch die Diskrepanz zwischen Lautstärke und Richtung der Tonspur zum Emitter auftreten. Wenn die nutzende Person sich neben einem sprechenden Avatar befindet, das gesprochene Wort allerdings aus einem weit entfernt klingenden Ort kommt, stört dies die Illusion. Ähnlich dem Prinzip der visuellen Wahrnehmung, ist beim haptischen

Bewusstsein oftmals kein oder nur geringes Feedback zu implementieren, wenn dieses als zu stark unnatürlich wahrgenommen wird. So ist es grundsätzlich sinnvoll durch z. B. Vibration dem Anwendenden ein Feedback über eine Situation zu geben wie z. B. dass dieser gerade einen gefährlichen Gegenstand berührt. Allerdings sollte dies nur kurzzeitig und schwach durchgeführt werden, da dieser Gegenstand im realen nicht vibrieren würde. Weniger ist manchmal mehr. Ähnliches gilt für die olfaktorische und gustatorische Wahrnehmung.

Innerhalb der Präsenz spielt das Körpergefühl eine sehr große Rolle. Hier treten gehäuft Probleme und gravierende Fehler auf. Verursacht werden diese hauptsächlich dadurch, dass der natürliche Körper nicht mit dem virtuellen Körper übereinstimmt. Dies stört die Präsenz signifikant, wodurch generell zu empfehlen ist, nur Teile des Körpers abzubilden, welche sicher positioniert werden können. Ähnlich ist es mit Körperbewegungen. Sind diese stark unnatürlich oder weichen zu sehr von der eigentlichen realen Bewegung ab, stört dies nicht nur die Illusion [48], es führt meist auch zu Cybersickness. Das Auftreten eines solchen Effekts verhindert den dauerhaften Einsatz der bewertenden Applikation.

Für die Wechselwirkung gilt ein ähnliches Vorgehen wie bei der Immersion. Dabei ist zu beachten, dass sich die Formen an die digitalen Methoden anpassen und für den Nutzenden mittlerweile die Bewegung einer Maus oder das Interagieren mit einem Touch-Display natürlich vorkommt. Es gilt also nur gravierende Abweichungen zu bewerten. Diese Abweichung bildet auch den Uncanny-Valley und die Nicht-Akzeptanz durch den Nutzenden ab (siehe Abbildung 2-20).

Der Begriff der Abweichung wird somit als solche gewählt, da es sich tatsächlich darum handelt. Die natürliche und die künstliche Realität unterscheiden sich so voneinander, dass eine erfahrbare Abweichung für den Anwendenden entsteht. Dies führt zum Verlust der Präsenz und wird deshalb ebenfalls als negativer Faktor in die Formel 4.5 aufgenommen.

4.2.5 Zusammenfassung des Pan-Faktors

In diesem Kapitel wird das Konzept für eine Bewertungsskala für Anwendungen der Digitale Realität beschrieben. Die drei wichtigen Einflussfaktoren zur Bewertung einer immersiven und interaktiven Applikation werden erläutert und kategorisiert. Mittels der Bewertung von Qualität und Quantität der einzelnen Bereiche können objektive Werte festgelegt und summiert werden. Aus den Formeln 4.6, 4.8 und 4.9 eingesetzt in Formel 4.5 ergibt sich somit die detaillierte Formel 4.10 für den Pan-Faktor.

Der Pan-Faktor soll einen Wert liefern, der universell im Bereich der Ingenieur Anwendungen, einfach und einheitlich ist. Aufbauend auf der Immersion, Präsenz und Wechselwirkung einer Anwendung können so Qualitäten und Quantitäten bewertet werden. Diese wurden in den Tabellen dieses Kapitels ausgeführt und mit den Kennwerten der Freiheitsgrade und dem Anwendungsbereich unterstützt. Eine einheitliche Bewertung soll damit ermöglicht werden. Der Wert dient zur Bewertung von virtuellen Applikationen der Digitalen Realität und ermöglicht den Vergleich verschiedener Medien, Anwendungen und damit einhergehender Forschung. Durch detaillierte Informationen sollen die Bewertung und Berechnung des

Pan-Faktors objektiv ermittelt werden können. Eine mögliche Umsetzung zur Ermittlung des Pan-Faktors ist in Kapitel 5.1 beschrieben.

$$\begin{aligned}
 \text{Pan-Faktor} &= \text{Immersion} + \text{Präsenz} + \text{Wechselwirkung} \\
 &= \left[(2 * n_{\text{Sinne}}) + (V_{ql} + V_{qn}) + (A_{ql} + A_{qn}) + (H_{ql} + H_{qn}) + (O_{ql} + O_{qn}) + (G_{ql} + G_{qn}) \right] \\
 &\quad + \left[(K_{ql} + K_{qn}) + (B_{ql} + B_{qn}) \right] \\
 &\quad + \left[(I_{ql} + I_{qn}) + (KO_{ql} + KO_{qn}) \right] + \Delta\delta
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

mit: Maßeinheit := Pan-Punkte (PP)

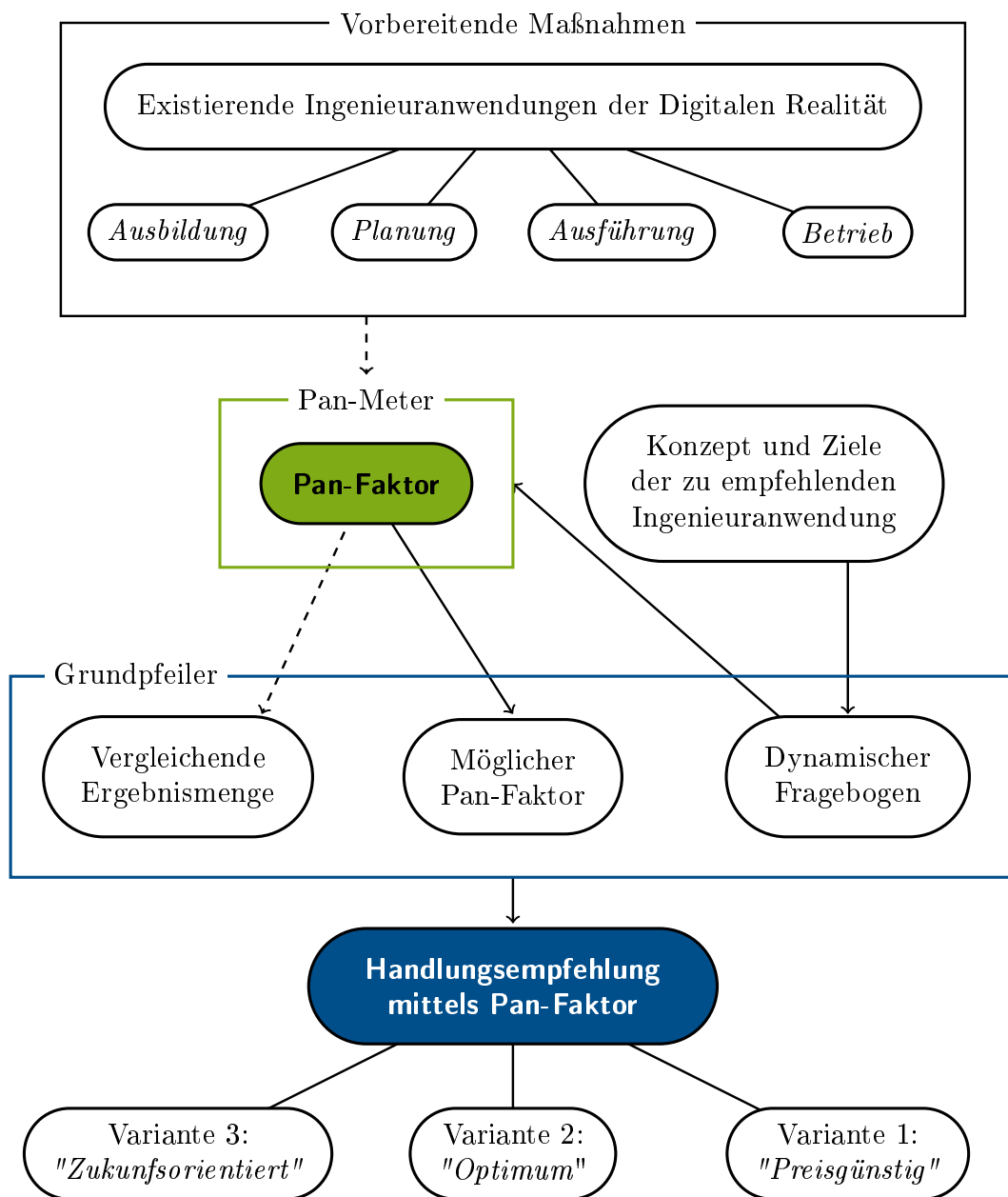
V	:= Visuelle Wahrnehmung
A	:= Auditive Wahrnehmung
H	:= Haptische Wahrnehmung
O	:= Olfaktorische Wahrnehmung
G	:= Gustatorische Wahrnehmung
K	:= Körpergefühl
B	:= Bewegung
I	:= Interaktion
KO	:= Kommunikation
$\Delta\delta$:= Abweichung
ql	:= Qualität
qn	:= Quantität
$f(x)$	$:= \begin{cases} (x_{ql} + x_{qn}) & \text{für } x_{ql} > 0 \wedge x_{qn} > 0 \\ 0 & \text{für } x_{ql} = 0 \vee x_{qn} = 0 \end{cases}$

4.3 Konzept zur Handlungsempfehlung für die ingenieurgerechte Anwendungsentwicklung in der Digitalen Realität

Mit Hilfe des Pan-Faktors können Anwendungen in das erweiterte Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum eingeordnet und der Grad der natürlichen Realität beziffert werden. Dies ermöglicht einen Vergleich von Anwendungen in verschiedenen Bereichen als auch eine Grundlage für weitere Forschung. Es ist dadurch beispielsweise möglich zukünftig eine Handlungsempfehlung für Ingenieur Anwendungen zu definieren. Mit dem einheitlichen Vergleich zu anderen Anwendungen kann eine Aussage getroffen werden, wenn eine neue Applikation entwickelt werden soll. Es können Grenzen und Stärken sowie ideale Medien- und Displayarten aufgezeigt werden. Damit ist es möglich, über die verschiedenen Technologien eine aussagekräftige Entscheidung oder Machbarkeitsanalyse zu treffen. Eine solche Handlungsempfehlung soll im Rahmen dieser Arbeit aufgezeigt und validiert werden. Eine Abbildung für ein Konzept zur Entwicklung einer solchen Handlungsempfehlung mittels Pan-Faktor ist in Abbildung 4-4 dargestellt und im Folgenden näher erläutert.

4.3.1 Anforderungen an eine Handlungsempfehlung

Eine Handlungsempfehlung sollte individuell und passend für eine gezielte Problematik oder Anwendungsfall ausgelegt sein. Ein Ingenieur oder Ingenieurin sollte den Wunsch einer Lösung beschreiben und das Problem beziffern können, um daraus eine Lösungsstrategie als Handlungsempfehlung zu erhalten. Das Ergebnis einer solchen Lösung sollte verständlich präsentiert werden und Aussagen zur Nutzung geeigneter Medien wie auch teilweise Hardwarekomponenten enthalten. Mit Hilfe dieser Angaben könnte ein Ingenieur oder eine Ingenieurin die Machbarkeit der Lösungsstrategie validieren und die Umsetzung zielgerichtet durchführen. Die Handlungsempfehlung richtet sich folglich an Ingenieure und



© 2020

Abbildung 4-4: Konzept für eine Handlungsempfehlung mittels Pan-Faktor

Ingenieurinnen, die zur Lösung ihres Problems Medien der Digitalen Realität nutzen wollen und können. Dabei soll die Anforderung an den Ingenieur und die Ingenieurin so gering als möglich ausfallen. Dieser soll sein Problem verstehen und beschreiben können, aber es soll kein detailliertes Wissen über die Medien der Digitalen Realität nötig sein. Ingenieure und Ingenieurinnen sollen diese Empfehlung nutzen können, um einen Lösungsvorschlag zur Darstellung oder Nutzung im idealen Medium innerhalb des erweiterten Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum zu erhalten.

Die Anforderung an die Handlungsempfehlung mittels Pan-Faktor lassen sich somit auf folgende wesentliche Punkte zusammenfassen.

- problemorientiert
- ingenieurspezifisch
- individuell
- aussagekräftig

Um dies leisten zu können, muss die Handlungsempfehlung aus mehreren Grundpfeilern bestehen. Diese sind in Abbildung 4-4 innerhalb des blauen markierten Rechtecks abgebildet und beschreiben einmal einen individuellen bzw. dynamischen Fragebogen (siehe Kapitel 4.3.4). Zum anderen ist es der direkte Vergleich mit anderen Anwendungen und Forschungsansätzen, welche mittels Pan-Faktor bewertet und somit vergleichbar gemacht werden. Die resultierende Ergebnismenge in ihrem Minimum, Maximum und Durchschnitt kann aussagekräftig die Möglichkeiten aber auch die Diskrepanz zu einer neuen Applikation aufzeigen. Dafür wird von der zu empfehlenden Anwendung der mögliche Pan-Faktor ermittelt und in Relation zu den anderen gesetzt. Die Handlungsempfehlung kombiniert damit drei Bestandteile, welche zusammen ein aussagekräftiges Ergebnis im Bereich der digitalen Ingenieurmethoden innerhalb der Digitalen Realität liefern kann.

4.3.2 Der Pan-Faktor als Vergleichsparameter

Für die Handlungsempfehlung ist der Pan-Faktor die vergleichende Komponente. Zum einen mit anderen Anwendungen, wie in Kapitel 4.3.3 beschrieben. Zum anderen bestehend aus einem möglichen Pan-Faktor oder Pan-Faktor-Bereich, der eine Aussage trifft, wie die zu empfehlende Applikation einzuordnen ist. Es wird demnach der Pan-Faktor der zu empfehlenden Anwendung innerhalb der Erstellung der Handlungsempfehlung ermittelt, um damit diese in das erweiterte Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum als auch in Bezug auf andere Ingenieur Anwendungen einordnen zu können.

Dieser Grundpfeiler ist die Basis des Vergleichs und somit die Einordnung innerhalb der vielfältigen Medien- und Hardwarelandschaft. Mit Hilfe diesem können Varianten für Lösungen mit geringerer oder höherer natürlicher Realität aufgezeigt werden.

4.3.3 Analyse vorhandener Ingenieur Anwendungen im Bereich der Digitalen Realität

Ein weiterer Grundpfeiler der Handlungsempfehlung ist die Verwendung einer Ergebnismenge bestehend aus der Analyse bereits existierender Ingenieur Anwendungen (siehe Abbildung 4-4 schwarzes Rechteck). Die Herausforderung stellt hierbei die große Menge an Softwarelösungen für Ingenieur Anwendungen dar, welche stetig wächst. Es wäre ideal diese vollständig mit dem Pan-Faktor zu bewerten

und somit in der Ergebnismenge nutzbar zu machen. Allerdings ist dies im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Somit wird sich im Folgenden auf alle Ingenieur Anwendungen konzentriert, welche mit Hilfe der Medien VR, AR, Erweiterte Virtualität, Mixed-Reality und am Rande auch 360°-Foto oder Video umgesetzt wurden. Diese Medien wurden gewählt, da sie wie in Abbildung 3-1 aufgezeigt, Technologien sind, welche seit kurzem im Massenmarkt vorhanden und preisgünstig sind. Neben der Fokussierung auf die neuen Technologieformen, wird der Vergleich durch die Kategorisierung in unterschiedliche Bereiche präzisiert. Im Rahmen dieser Arbeit werden digitale Ingenieur Anwendungen in den Bereichen der **Ausbildung, Planung, Ausführung und Betrieb** im Bau- und Umweltwesen betrachtet und als solche eingeteilt (siehe Abbildung 4-4).

Es werden 102 digitale Ingenieur Anwendungen innerhalb der genannten Bereiche untersucht und der Pan-Faktor ermittelt (siehe Kapitel 5.2). Innerhalb dieser Ergebnismenge können anschließend Maximum, Minimum und der Durchschnittswert eines jeden Bereichs festgestellt werden. Diese Werte ermöglichen die Einordnung der zu empfehlenden Anwendung mittels des möglichen Pan-Faktors aus Kapitel 4.3.2. Mit seiner Hilfe können Varianten innerhalb der Ergebnismenge und Beispiele aufgezeigt werden.

4.3.4 Der Dynamische Fragebogen

Um den möglichen Pan-Faktor, der zu empfehlenden Anwendung, sowie die vergleichende Ergebnismenge zu erhalten, ist ein Fragebogen nötig. Darüber hinaus können somit Empfehlungen im Bereich des geeigneten Mediums oder der Displayarten in den Bereichen der visuellen, auditiven, haptischen, olfaktorischen und gustatorischen Wahrnehmung, aber auch im Bereich der Bewegung und des Körpergefühls generiert werden. Der Fragebogen soll vom Ingenieur und Ingenieurin ohne Vorwissen zu den Medien der Digitalen Realität nutzbar und dabei so kurz als möglich sein. Dies kann ermöglicht werden, wenn der Fragebogen dynamisch erzeugt wird und sich an die Anforderungen bzw. die Antworten des Nutzenden anpasst. Außerdem sollten die Fragen so gestaltet werden, dass diese eine direkte und indirekte Ergebnismenge generieren. Das direkte Ergebnis ist die Antwort des Anwendenden. Gleichzeitig ergibt sich ein Ausschluss der Möglichkeiten, welcher ebenfalls die Führung durch den Fragebogen verändern kann, da einzelne Fragen nicht mehr direkt beantwortet werden müssen. Folglich entstehen Bedingungen und Abhängigkeiten welche bedingt durch die Beantwortung für eine Dynamik innerhalb des Fragebogens sorgen. Diese Dynamik führt dazu, dass der Fragebogen individuell angepasst wird und die nutzenden Person nicht mehr Fragen als nötig beantworten muss, um eine Handlungsempfehlung zu erhalten. Das Konzept für einen solchen Fragebogen ist komplex und soll im Folgenden vorgestellt werden.

Um einen Fragebogen erstellen zu können, muss klar sein, welches Ergebnis gewünscht ist. In diesem Fall geht es darum eine ausführliche Empfehlung zu entwerfen, welche zum einen auf dem Pan-Faktor als Vergleichsparameter aber auch faktisch auf eine Medienart mit der Nutzung verschiedener Displaytypen in unterschiedlicher Qualität beruht. Die nutzende Person soll demnach als Ergebnis eine Variante erhalten, die das geeignete Medium für die Anwendung als auch die idealen Displayarten und den möglichen Pan-Faktor aufzeigt. Daneben ist es denkbar eine technologisch bessere Variante und eine technologisch schlechtere Variante zu präsentieren. Dies macht dann Sinn, um weitere Möglichkeiten aufzuzeigen, welche den Horizont erweitern können oder die Anwendung zukunftsorientiert gestalten. Dabei muss

darauf geachtet werden, dass die Varianten keine der klar ausgeschlossenen Technologien beinhalten. Es ist demnach klar, was der Fragebogen liefern soll. Dadurch ist es möglich die einzelnen Fragebereiche festzulegen. Zum einen sind dies die allgemeinen Fragen, der Filter des geeigneten Mediums und Fragen bezüglich der Art und Weise der Immersion, Präsenz und der Wechselwirkung (siehe UML-Flussdiagramm Abbildung 4-5).

© 2020

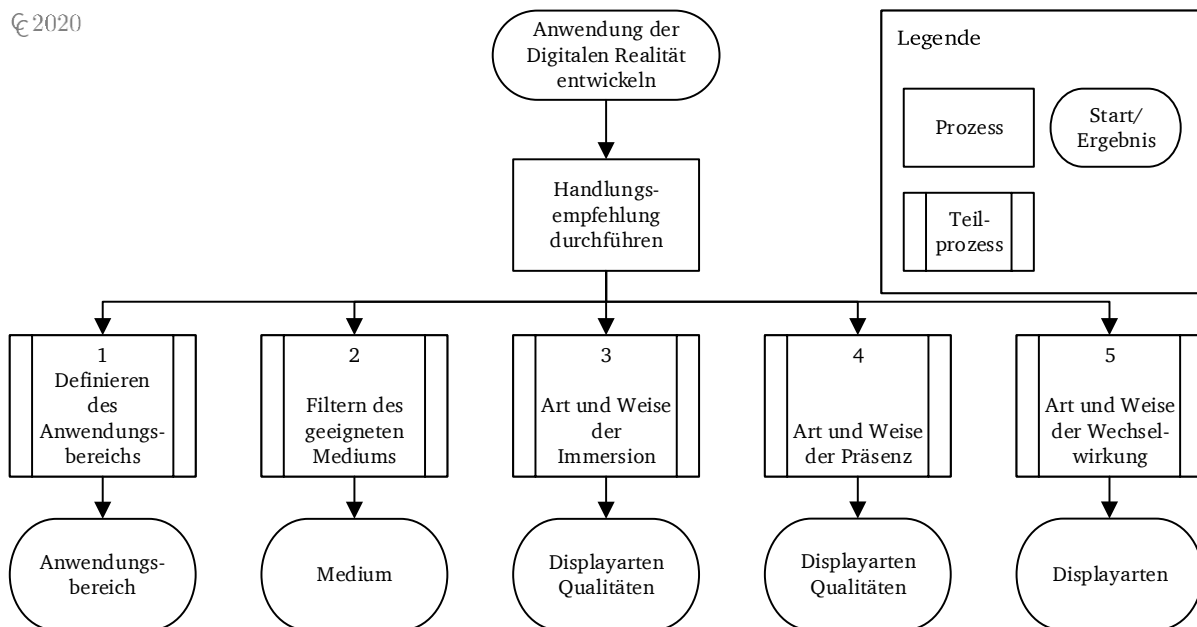


Abbildung 4-5: Übersicht zum Aufbau des dynamischen Fragebogens von Tabelle A-13

Die allgemeinen Fragen liefern die Information in welchem Bereich die Anwendung stattfindet, für welche Dauer diese ausgelegt und die Bewegung des Nutzenden relevant sein soll. Der Filter des Mediums ergibt - wie der Name bereits sagt - das ideale Medium für die Anwendung. Die Art und Weise der Immersion ist wiederum in die einzelnen Sinneswahrnehmungen unterteilt und liefert jeweils die geeignete Qualität und Displayart zurück. Genauso ist es bei der Präsenz, welche unterteilt in Körpergefühl und Bewegung ist. Der Bereich der Wechselwirkung, unterteilt in Kommunikation und Interaktion, gibt nur die Displayart zurück. Dies ist in einer groben und allgemeinen Darstellung in Abbildung 4-5, aber detailliert als UML-Entscheidungsbaum mit Verknüpfungen in den folgenden Abschnitten dargestellt.

Insgesamt wurden 68 Fragen erstellt, die maximal zur Beantwortung aller relevanter Themen ausgeführt werden müssen. Die Fragen wurden größtenteils als „Ja-Nein“-Fragen umgesetzt, um die Beantwortung einfach zu gestalten und Fehler zu vermeiden. Außerdem können diese somit schnell und klar beantwortet werden. Die Fragen können miteinander verknüpft sein, um somit Synergieeffekte zu erzeugen. Diese werden im Folgenden für alle fünf Bereiche näher erläutert und das Ziel bzw. Ergebnis herausgearbeitet.

i) Allgemeine Fragen

Der erste Bereich ist der Kleinste und dient hauptsächlich dazu die Applikation innerhalb der anderen Ingenieur Anwendungen einzuordnen. Durch die Frage 1.1 in Abbildung 4-6 oder Tabelle A-13 können

Maxima, Minima und Durchschnittswerte innerhalb der richtigen Kategorie aus der Ergebnismenge in Kapitel 4.3.3 herausgefiltert werden. Des Weiteren wird die Nutzungsdauer in Frage 1.2 abgefragt, welche Auswirkungen auf die Wahl der Displays hat. Es gibt Untersuchungen, dass Head-Mounted-Displays bei einer Nutzung von über 60 Minuten am Stück zu negativen Erscheinungen führen können, weshalb davon abgeraten werden sollte (siehe Kapitel 2.3.5 & Tabelle 2-1). Die Ergebnisse dieses Bereiches werden in den anderen genutzt, um eventuell Fragerichtungen bzw. Abzweigungen anders zu gestalten. So ist die Frage 1.2 mit den Fragen 2.1.1.1.1.2 und 3.I.b.1.1.2 verbunden (siehe gestrichelter blauer Pfeil mit Bezeichnung Link in UML-Flussdiagramm Abbildung 4-6). Eine Darstellung der verzweigten Entscheidungshierarchie als UML-Flussdiagramm findet sich in Abbildung 4-6².

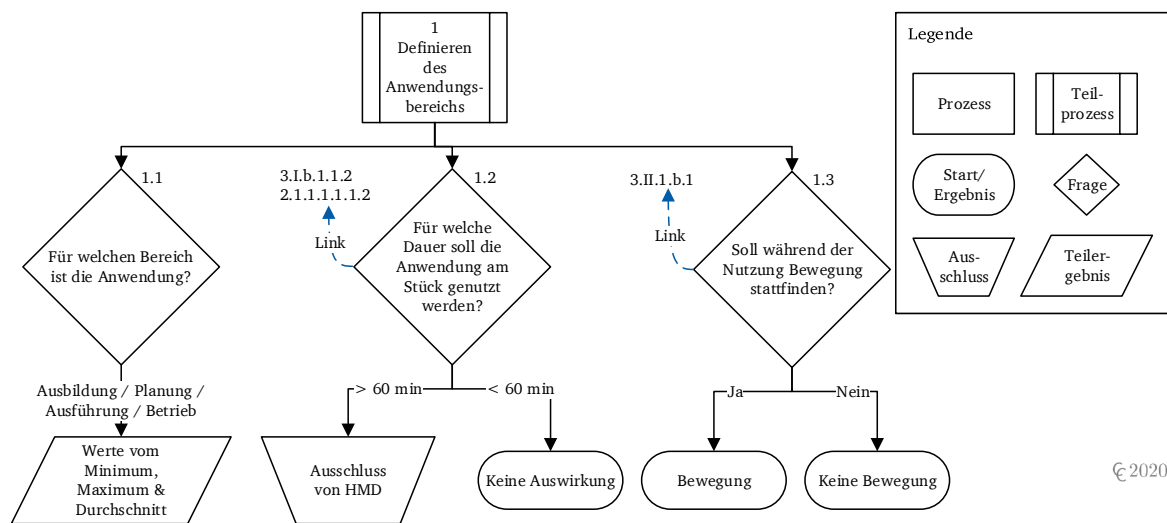


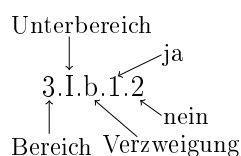
Abbildung 4-6: Handlungsempfehlung Bereich 1: Definieren des Anwendungsbereichs

ii) Fragen zur Filterung des Mediums

Die Filterung des geeigneten Mediums stellt eine größere Herausforderung dar. Alle Medien innerhalb der Digitalen Realität sollen in der Handlungsempfehlung als Ergebnis entstehen können. Ziel dieses Bereiches ist es genau ein Medium als geeignetes Ergebnis für die zu empfehlende Applikation zurückzugeben. Um dies zu erreichen wurden zehn Fragen entwickelt, welche in Tabelle A-13 aufgezählt und deren Zusammenhang im UML-Flussdiagramm Abbildung 4-7 veranschaulicht sind.

Die Frage 2.1 ist eine zusätzliche Frage, welche in negativer Richtung die Digitale Realität ausschließt

² Die Nummerierung der Fragen erfolgt damit einem einheitlichen Schema, um anhand dieser die Zuordnung in den jeweiligen Bereich und der Abzweigung ablesen zu können. Die oberen Teilbereiche des Fragebogens werden von 1 bis 5 nummeriert. Innerhalb dieser wird jeder Bereich mit den römischen Ziffern I bis maximal V versehen. Jede weitere gleichwertige Abzweigung wird mit a) oder b) unterschieden und jede Verzweigung wird bei positiver Richtung ($\hat{=}$ Ja) mit einer 1 und in negativer Richtung ($\hat{=}$ Nein) mit einer 2 weitergeführt. So ergeben sich verkettete Bezeichnungen z. B.



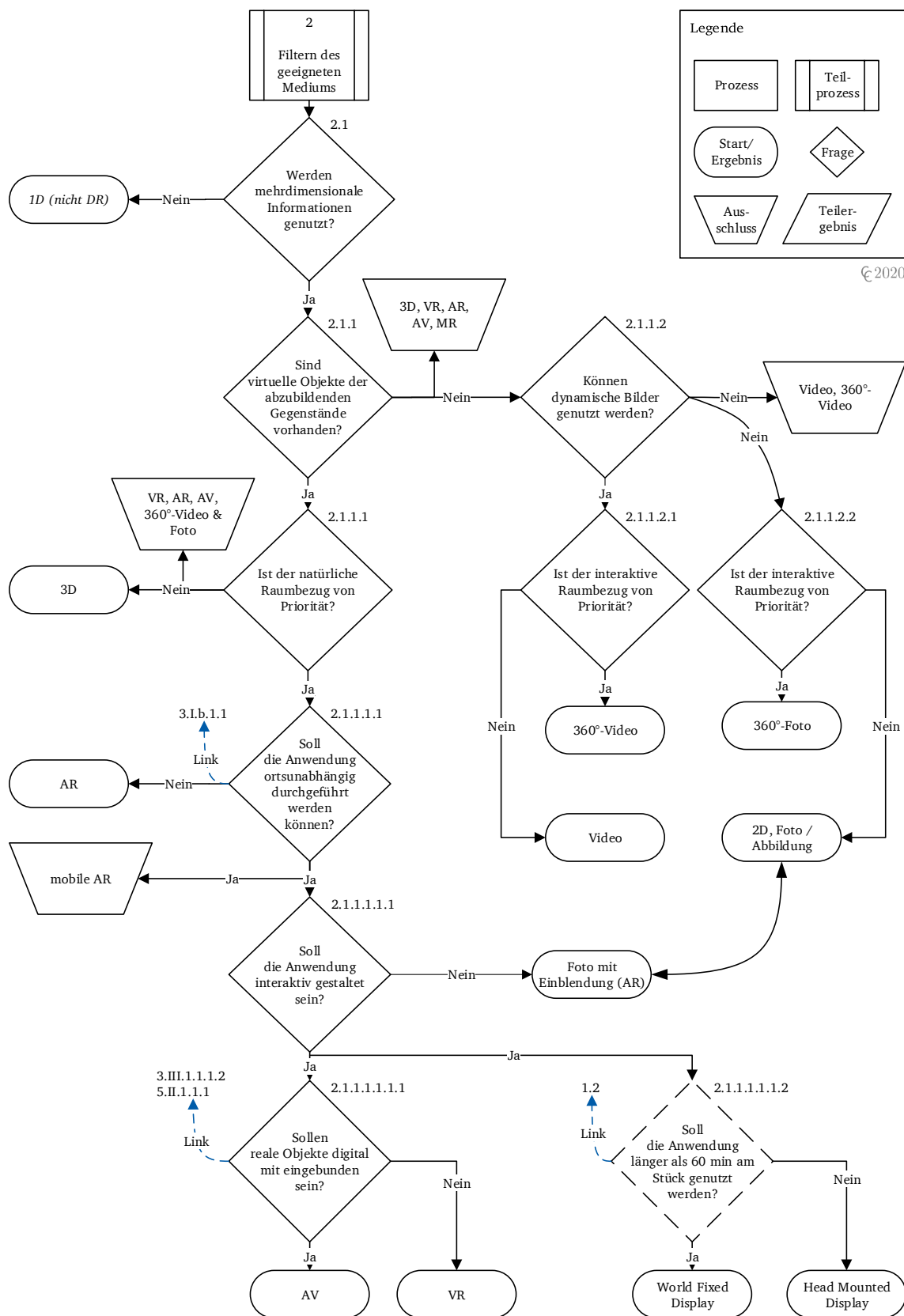


Abbildung 4-7: Handlungsempfehlung Bereich 2: Filtern des geeigneten Mediums von Tabelle A-13

und somit die Handlungsempfehlung negiert. In diesem Fall kann keine Empfehlung ausgesprochen werden. Dennoch ist es wichtig, dies explizit zu erfragen, da es sicherlich den Fall gibt, dass die Digitale Realität nicht die richtige Lösungsform des Problems darstellt. Andernfalls werden mit den Fragen gezielt die einzelnen Medien ausgeschlossen, um dabei das Geeignete eingegrenzt. Dabei gibt es mit Frage 2.1.1 eine entscheidende Trennung (siehe UML-Flussdiagramm Abbildung 4-7), da mit der Frage nach virtuellen Objekten gefragt wird. Sind diese nicht modelliert, keine 3D-Informationen vorhanden und somit keine künstlichen Objekte, sondern nur Abbilder wie Fotos oder Videos vorhanden, sind VR, Erweiterte Virtualität, AR und Mixed-Reality nicht möglich und es bleiben nur die Darstellung in 360°-Fotos bzw. Videos oder klassischen Fotos oder Videos. Eine Sonderform stellt das negative Ergebnis von Frage 2.1.1.1.1 oder 2.1.1.2.2 dar. Hier handelt es sich um eine statische AR. Dies ist eine Fotografie oder Video mit der statischen Ergänzung eines virtuellen Objekts, ähnlich wie ein Standbild einer AR-Anwendung. Diese Form wurde im Kapitel 3.1 nicht behandelt, wird aber dennoch in der Handlungsempfehlung berücksichtigt. Am Ende eines jeden Strang folgt ein Medium, welches für die Applikation am geeignetsten erscheint. Es sind mindestens eine und maximal sechs der zehn Fragen zu beantworten, um an ein aussagekräftiges Ergebnis zu gelangen.

iii) Fragen zur Art und Weise der Immersion

Lässt sich die Filterung des Mediums mit Hilfe von zehn Fragen und einem Entscheidungsbaum auf einer Seite (siehe UML-Flussdiagramm Abbildung 4-7) darstellen, ist die Immersion wesentlich komplexer. Diese wird wie bereits im Kapitel 2.1 in fünf weitere Unterabschnitte eingeteilt. Diese entsprechen den Sinnen und berücksichtigen die visuelle ($\hat{=}$ I), auditive ($\hat{=}$ II), haptische ($\hat{=}$ III), olfaktorische ($\hat{=}$ IV) und gustatorische ($\hat{=}$ V) Wahrnehmung. 33 Fragen sind innerhalb dieses Konzepts entwickelt worden, um alle Qualitäten und Displayarten der verschiedenen Wahrnehmungsformen erörtern zu können (siehe Tabelle A-13, sowie Abbildung 4-8, Abbildung 4-9, Abbildung 4-10, Abbildung 4-11 & Abbildung 4-12). Das Ziel ist es für jede Form der Immersion die geeignete Qualität und Displayart bzw. -arten feststellen zu können, vorausgesetzt der Sinn soll durch die zu empfehlende Applikation genutzt werden.

Fragen im Bereich der visuellen Wahrnehmung

Es wird davon ausgegangen, dass die visuelle Wahrnehmung in jedem Fall genutzt wird. Alle Medien der Digitalen Realität nutzen die visuelle Wahrnehmung und eine digitale Ingenieur-anwendung ohne visuelle Darstellung wird im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet. Es stellt sich somit nur die Frage wie realistisch die Darstellung und wie groß der Unterschied zwischen künstlicher und natürlicher Realität ist. Eine Definition einzelner visueller Qualitäten wurde bereits in Kapitel 4.2.1 und in der Tabelle 4-2 beschrieben. Auf Grundlage dieser Definitionen beruht das Konzept in diesem Bereich der Handlungsempfehlung. Dargestellt ist dies im UML-Flussdiagramm Abbildung 4-8. Die Fragen im Bereich von 3.I.a basieren auf den Erkenntnissen im Kapitel 2.1.2 und der daraus erarbeitete Vergleich und Diskrepanz der technischen Möglichkeiten zur natürlichen Realität (siehe Abbildung 2-2, Abbildung 2-3 & Abbildung 2-4). Die mögliche Abstraktion wird beschrieben und damit die geeignete Qualität der visuellen Wahrnehmung ermittelt.

Im Bereich 3.I.b wird die geeignetste Displayart aus Abbildung 2-5 ermittelt. Die große Unterscheidung liegt in den World-Fixed-Display und On-Body-Display und können mit gezielten Fragen oder wie

bei Frage 3.I.b.1.1 und 3.I.b.1.1.2 auf Ergebnisse aus der Medienfilterung und der allgemeinen Fragen zurückgegriffen werden. Das Ergebnis liefert die geeignete Displayart. Es sind im Bereich der visuellen Wahrnehmung mindestens drei und maximal fünf der acht Fragen direkt vom Anwendenden zu beantworten.

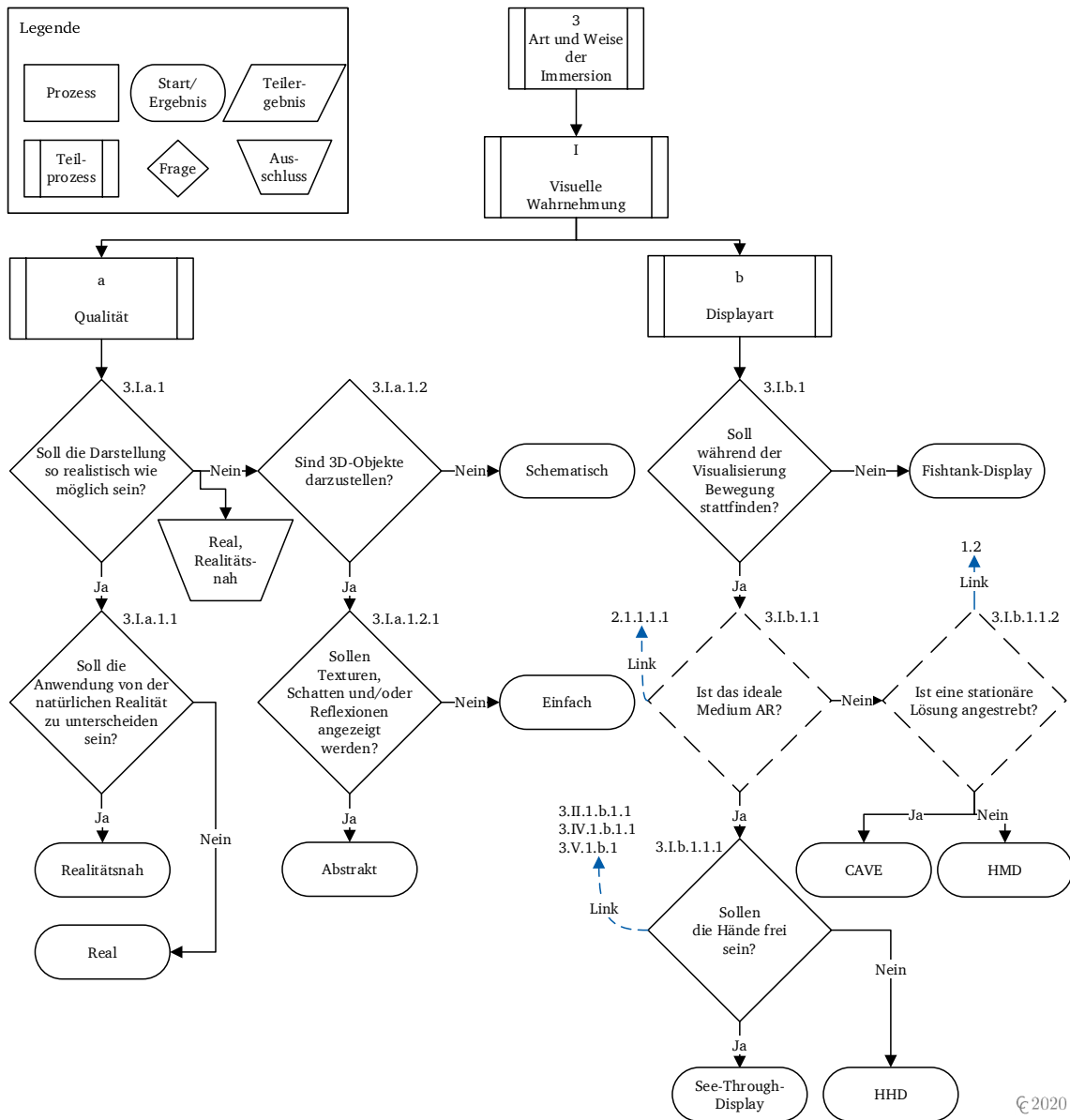
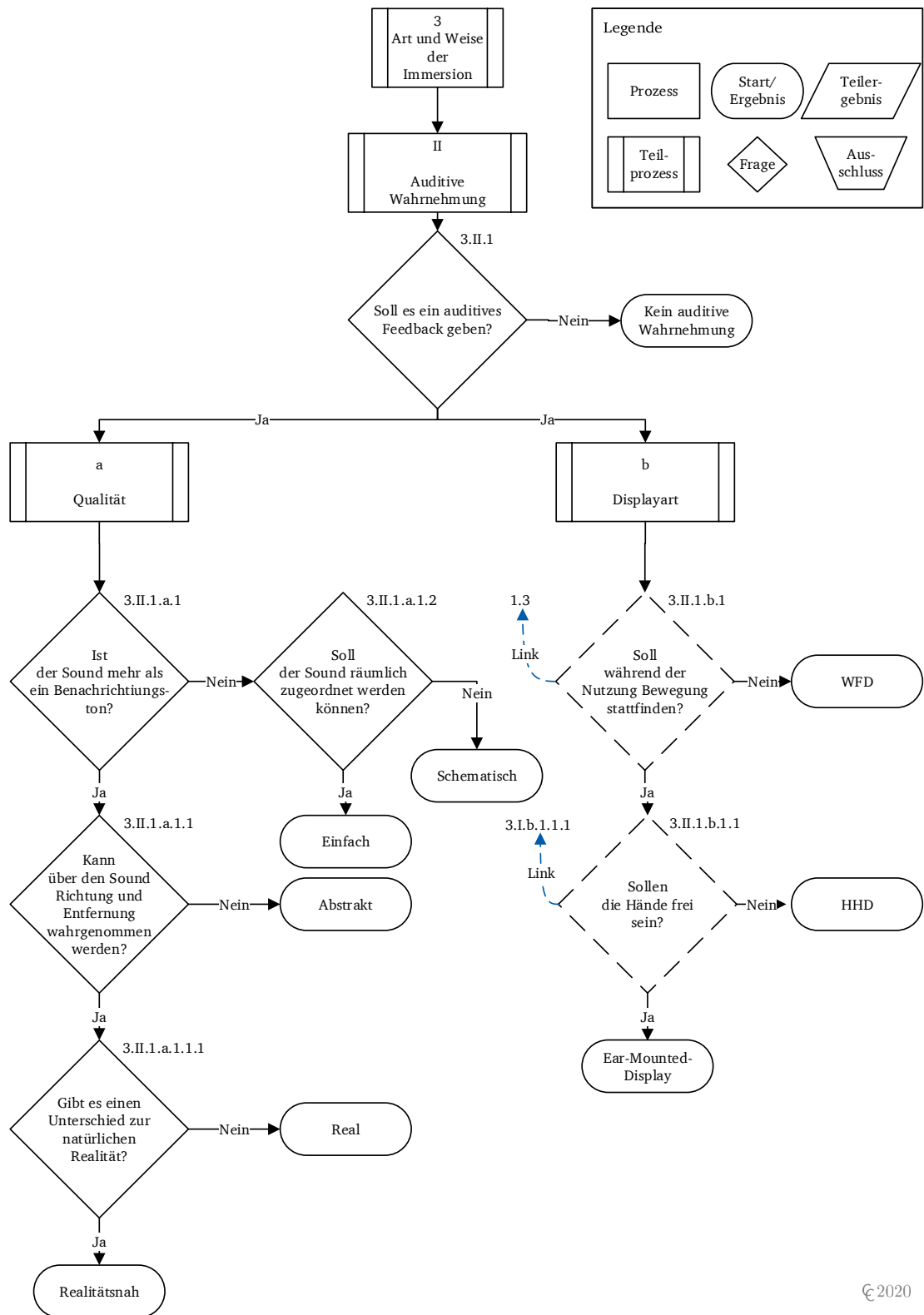


Abbildung 4-8: Handlungsempfehlung Bereich 3 I: Visuelle Wahrnehmung von Tabelle A-13

Fragen im Bereich der auditiven Wahrnehmung

Im Vergleich zur visuellen kann die auditive Wahrnehmung in der zu empfehlenden Applikation außen vorgelassen sein. Ein Einsatz ist zu empfehlen, allerdings nicht zwingend notwendig. Dies reduziert die Anzahl der mindestens zu beantwortenden Fragen auf eine. Maximal sind vier der sieben Fragen zu beantworten. Dies ist abhängig welchem Strang des Entscheidungsbaums gefolgt wird (siehe UML-



© 2020

Abbildung 4-9: Handlungsempfehlung Bereich 3 II: Auditive Wahrnehmung von Tabelle A-13

Flussdiagramm Abbildung 4-9 & Tabelle A-13).

Wenn eine auditive Sinnesreizung umgesetzt werden soll, dann wird innerhalb des Konzeptes die Qualität und die Displayart bzw. -arten ermittelt. Da in Kapitel 4.2.1 bzw. in der Tabelle 4-3 die Qualitäten sehr ausführlich definiert sind, orientiert sich die Fragestellung bezüglich der Qualität im Bereich von 3.II.1.a auf die Einstufung dieser. Das Endergebnis eines jeden Strangs bei der Beantwortung der Fragen führt zu den Qualitäten schematisch, einfach, abstrakt, realitätsnah oder real. Mit Hilfe der Fragen wurde versucht eine Doppeldeutigkeit auszuschließen.

Im Bereich der Displays stehen die Arten der World-Fixed-Displays, die Hand-Held-Display das Ear-Mounted-Display als Unterkategorie der On-Body-Display zur Verfügung. Die Ear-Mounted-Displays ermöglichen den größten Bewegungsfreiraum des Anwendenden, gefolgt von den Hand-Held-Displays und abschließend der World-Fixed-Display. Die World-Fixed-Display besitzen den entscheidenden Nachteil, dass ohne eine softwareseitige Nachbearbeitung die Bewegung des Nutzenden nicht verarbeitet wird und somit sich die Richtung der Soundquelle nicht an die Rotation und Translation anpasst. Deshalb lässt sich mit der Bewegung eingrenzen, ob ein World-Fixed-Display sprich fixierte Lautsprecher oder On-Body-Display genutzt werden soll. Diese Informationen können bereits über die allgemeinen Fragen abgedeckt werden, weshalb eine Verknüpfung zu Frage 1.3 besteht. Es ist demnach nur noch zu unterscheiden, ob die Hände ebenfalls frei genutzt werden sollen. Ist dies der Fall muss ein Ear-Mounted-Display wie Overear oder Inear-Kopfhörer benutzt werden. Diese Frage ist gleich der Frage 3.1.b.1.1.1, weshalb diese nicht zwingend nochmals gestellt werden muss.

Im Bereich der auditiven Wahrnehmung sind die Synergieeffekte des dynamischen Fragebogens bereits sichtbar und können zur Reduktion des Aufwands für den Anwendenden genutzt werden (siehe blaue Verbindungen und Pfeile sowie in Abbildung 4-9 Fragen in punktierter Form).

Fragen im Bereich der haptischen Wahrnehmung

Die haptische Wahrnehmung ist in ihrer Qualitätsdefinition in Tabelle 4-4 so aufgebaut, dass diese meist existiert. Wie in Kapitel 2.2 ausführlich erörtert wurde, findet zur Kommunikation und Interaktion von Mensch zu Maschine immer eine haptische Komponente statt. Die Human-Computer Interaction schließen Haptik nur aus, wenn keine Interaktion stattfindet. Dies kann im Fall eines Fotos oder Videos sein. Sobald allerdings ein Maus-Klick oder eine Bewegung umgesetzt wird (z. B. 360°-Foto) ist eine schematische Qualität vorhanden. Deshalb kann es trotz einer negativen Antwort der Frage 3.III.1 dazu führen, dass eine haptische Reizung in schematischer Form stattfindet (siehe UML-Flussdiagramm Abbildung 4-10).

Die Qualität und Displayarten hängen in diesem Bereich besonders zusammen und deshalb wurde auf eine weitere Unterteilung im Fragebogen verzichtet. Die Fragen führen jeweils zu einer Qualität und verschiedener Displayarten. Es wird zwischen haptischen Impulsen in der Art von Vibrationen, Force-Feedback - sprich künstliche Kraftausübung - und realer Haptik beim Einbinden realer Gegenstände unterschieden. Dabei ergibt sich die Nutzung realer Gegenstände bereits bei der Wahl des Mediums von Erweiterte Virtualität und muss hier nicht nochmals explizit gefragt werden (Verknüpfung von Frage 3.III.1.1.1.2 mit 2.1.1.1.1.1 (siehe Tabelle A-13, sowie im UML-Flussdiagramm Abbildung 4-10)).

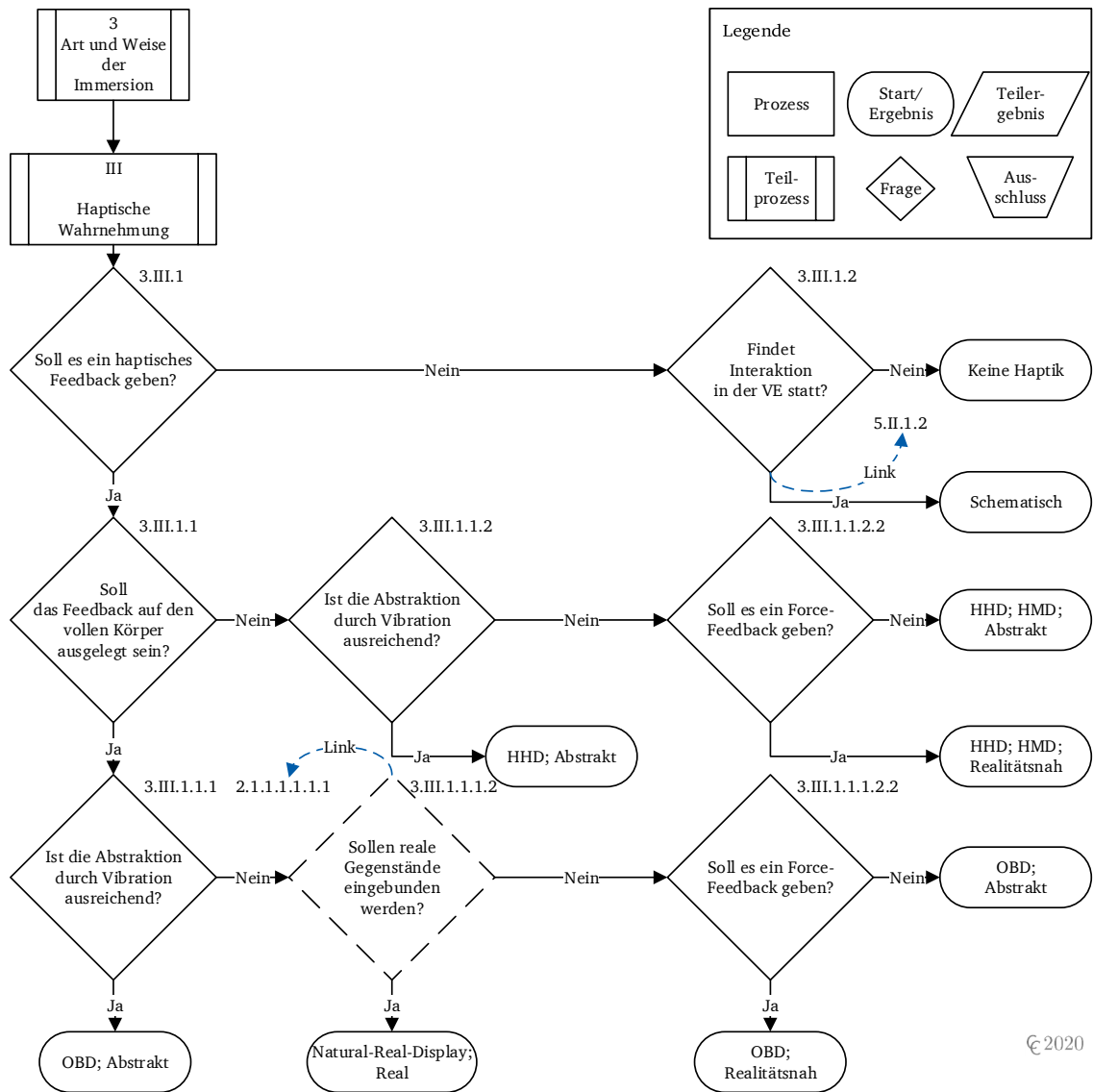
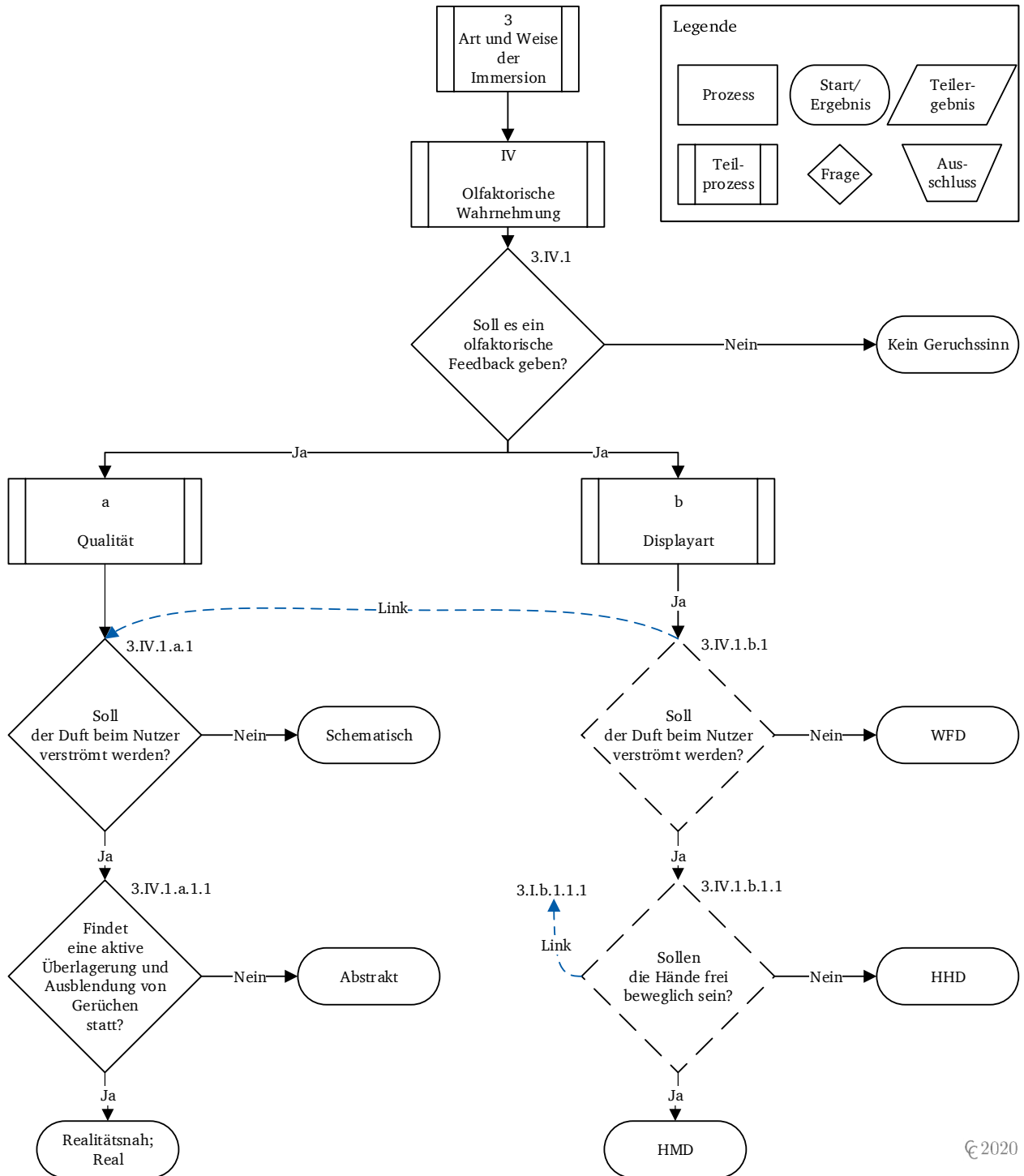


Abbildung 4-10: Handlungsempfehlung Bereich 3 III: Haptische Wahrnehmung von Tabelle A-13

Fragen im Bereich der olfaktorischen Wahrnehmung

Die Grundlagen haben bereits ergeben, dass die Reizung der olfaktorischen Wahrnehmung wesentlich schwieriger und ihr Einsatz bisher nur auf den Rahmen der Forschung beschränkt ist (siehe Kapitel 2.1.5). Die Definition der Qualität ist schwierig und beruht auf der Umsetzung von Überlagerung, Intensität und Anzahl von Duftstoffen. Dennoch sind im Konzept zwei Fragen basierend auf Tabelle 4-5 zur Beschreibung dieser entwickelt worden.

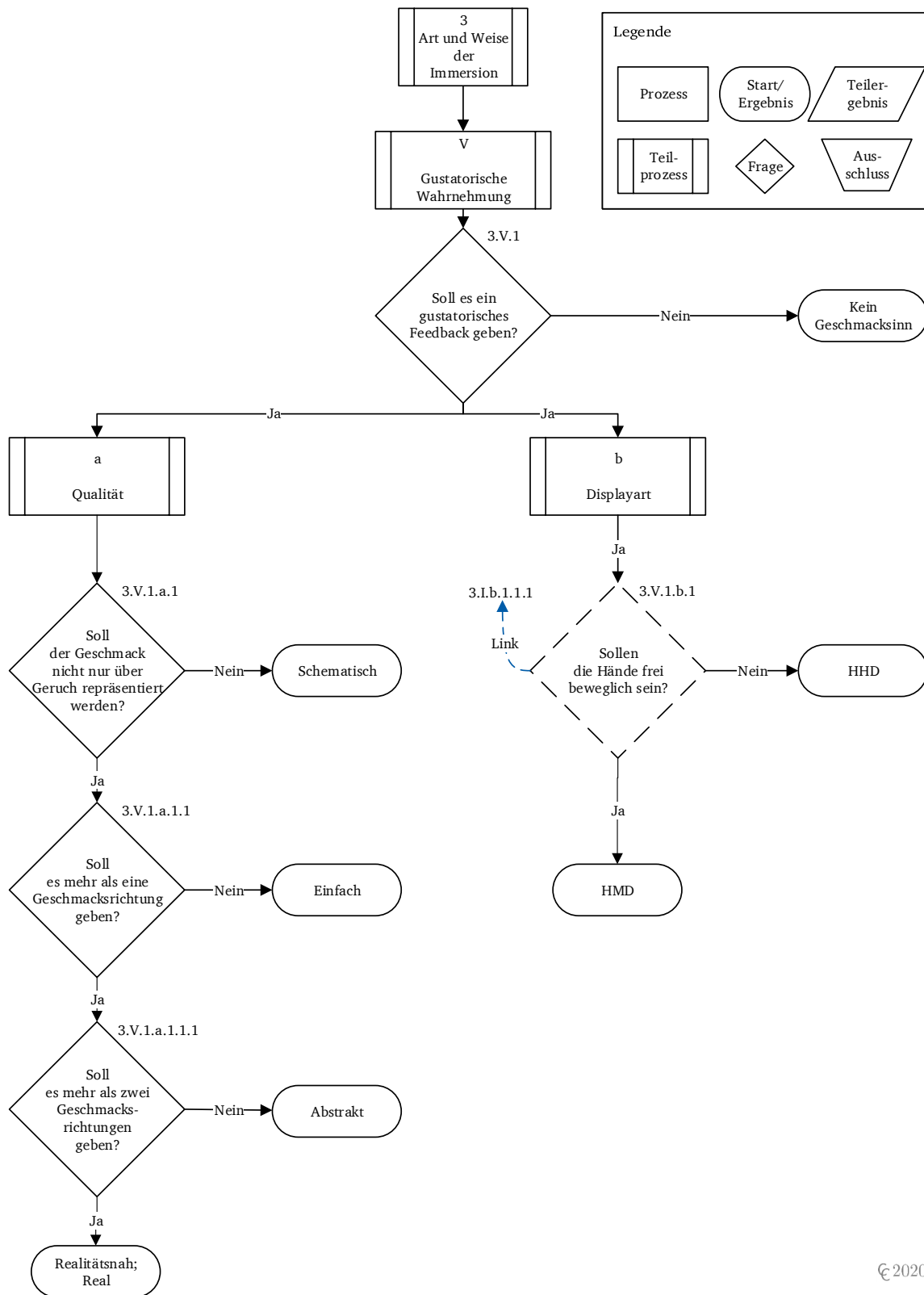
Die Displayart zeigen die Untersuchungen in Tabelle A-6 und der Abbildung 2-12, dass es Displays wie Head-Mounted-Display, On-Body-Display, Hand-Held-Display oder Head-Mounted-Display gibt, welche in zwei weiteren Fragen selektiert werden können. Dabei sind beide Fragen bereits mit vorherigen verknüpft, wodurch diese nicht explizit beantwortet werden müssen. Die fünf Fragen können somit auf maximal drei zu Beantwortende reduziert werden (siehe Tabelle A-13, sowie Abbildung 4-11). Mindest-



© 2020

Abbildung 4-11: Handlungsempfehlung Bereich 3 IV: Olfaktorische Wahrnehmung von Tabelle A-13

tens eine Frage ist zu beantworten, da diese festlegt, ob die olfaktorische Wahrnehmung generell genutzt werden soll.



© 2020

Abbildung 4-12: Handlungsempfehlung Bereich 3 V: Gustatorische Wahrnehmung von Tabelle A-13

Fragen im Bereich der gustatorischen Wahrnehmung

Wird die olfaktorische Wahrnehmung nur in Bereich der Forschung genutzt, so findet sich die Reizung der gustatorischen Wahrnehmung nur selten und ist kaum erforscht. Dennoch konnte in Tabelle 4-6 Definitionen zur Qualität erstellt werden, welche zu den Fragen im Bereich 3.V.1.a führen. Ist eine gustatorische Wahrnehmung vorhanden müssen somit maximal vier der fünf Fragen beantwortet werden (siehe UML-Flussdiagramm Abbildung 4-12).

Die Displayarten beschränken sich auf On-Body-Display, da Geschmack über den Mund und die Nase aufgenommen wird. Es hängt also hauptsächlich davon ab, ob die anwendende Person ein Gerät in der Hand hält oder diese frei bewegen kann. Diese Frage wurde mit 3.I.b.1.1.1 bereits beantwortet und müssen deshalb nicht nochmals explizit beantwortet werden (siehe Tabelle A-13, sowie im UML-Flussdiagramm Abbildung 4-12).

iv) Fragen zur Art und Weise der Präsenz

Die Präsenz wird in das Körpergefühl und die Bewegung unterteilt.

Fragen zum Körpergefühl

Das Körpergefühl wird, wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben, über das Wahrnehmen und Erfahren des Körpers in der virtuellen Umgebung erzeugt. Dabei geht es darum, den eigenen Körper zu spüren, zu sehen und bewegen zu können. Umso mehr Formen umgesetzt und umso mehr diese der natürlichen Realität entsprechen, desto größer ist das Körpergefühl.

Die Qualitäten des Körpergefühls sind basierend auf dieser Wahrnehmung und Bewegung in Tabelle 4-7 definiert worden und dienen nun als Grundlage für die Konzeptionierung der Fragen in Tabelle A-13 und UML-Flussdiagramm Abbildung 4-13. Die größte Unterscheidung findet dahingegen statt, ob nur die Hände - wie in den meisten Fällen - oder ob der ganze Körper wahrgenommen werden kann. Je nach Qualität wird auch die Displayart ausgewählt und so können die fünf Fragen auf mindestens eine und maximal vier reduziert werden.

Fragen zur Bewegung

Eine Bewegung findet wie das Körpergefühl ebenfalls immer statt, wenn Human-Computer Interaction genutzt wird. Deshalb ist davon auszugehen, dass in jeder digitalen Ingenieur Anwendung außer bei Fotografie und Video die Bewegung existiert. Diese kann selbstverständlich durch die reine Bewegung einer Maus einfach dargestellt werden, wie es Tabelle 4-8 genau beschreibt. Neben einer aktiven Bewegung von Hardware oder des Körpers wie in VR, existiert die passive Bewegung z. B. bei gezielter Kameraführung in einem Walk-Through innerhalb eines 3D-Gebäudemodells. Diese Bewegung ist schematisch und so können alle Formen und Definitionen des Pan-Faktors für die Erstellung der Fragen genutzt werden. Neben den Displayarten kann bei den Fragen im Bereich 4.II.b auch weitere Empfehlungsdetails gesammelt werden (siehe UML-Flussdiagramm Abbildung 4-14). So kann festgestellt werden, ob auf Hand-Controller verzichtet und die Anwendung auf Kameragestützte Verfahren wie z. B. bei der Leap-Motion [311] gesetzt werden, oder ob die Fortbewegung über softwareseitige Lösungen wie den Teleport zurückgegriffen werden soll. Ebenfalls wird erfragt, ob die Nutzung von Bewegungsplattformen in Frage kommen oder wie beim Lighthouse-Tracking die reale Bewegung übersetzt wird (siehe Kapitel 2.2.3).

Am Ende stehen die Qualität und jeweilig geeignete Display für die Bewegung und Fortbewegung fest. Dafür müssen maximal sieben der acht und mindestens eine Frage beantwortet werden.

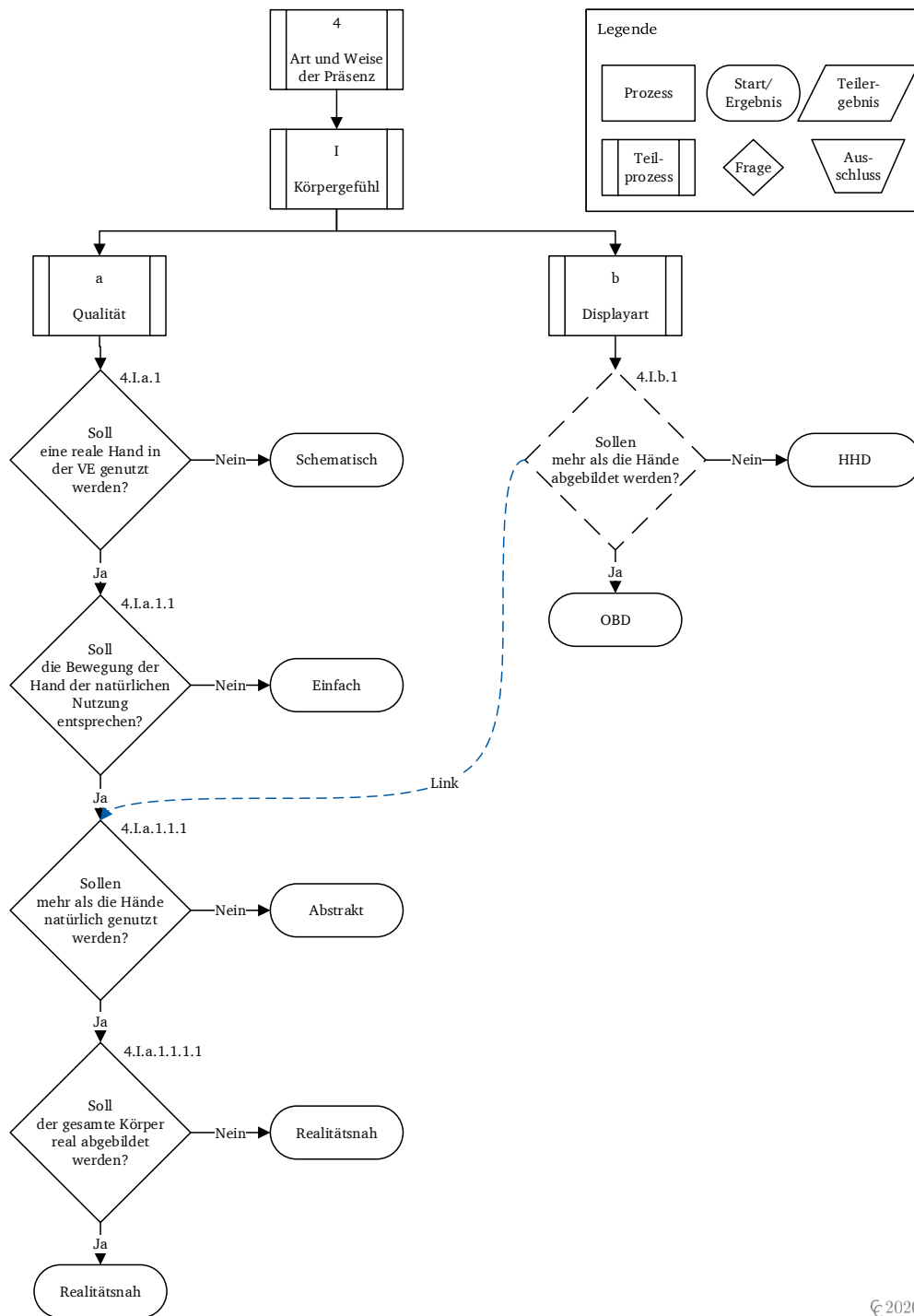
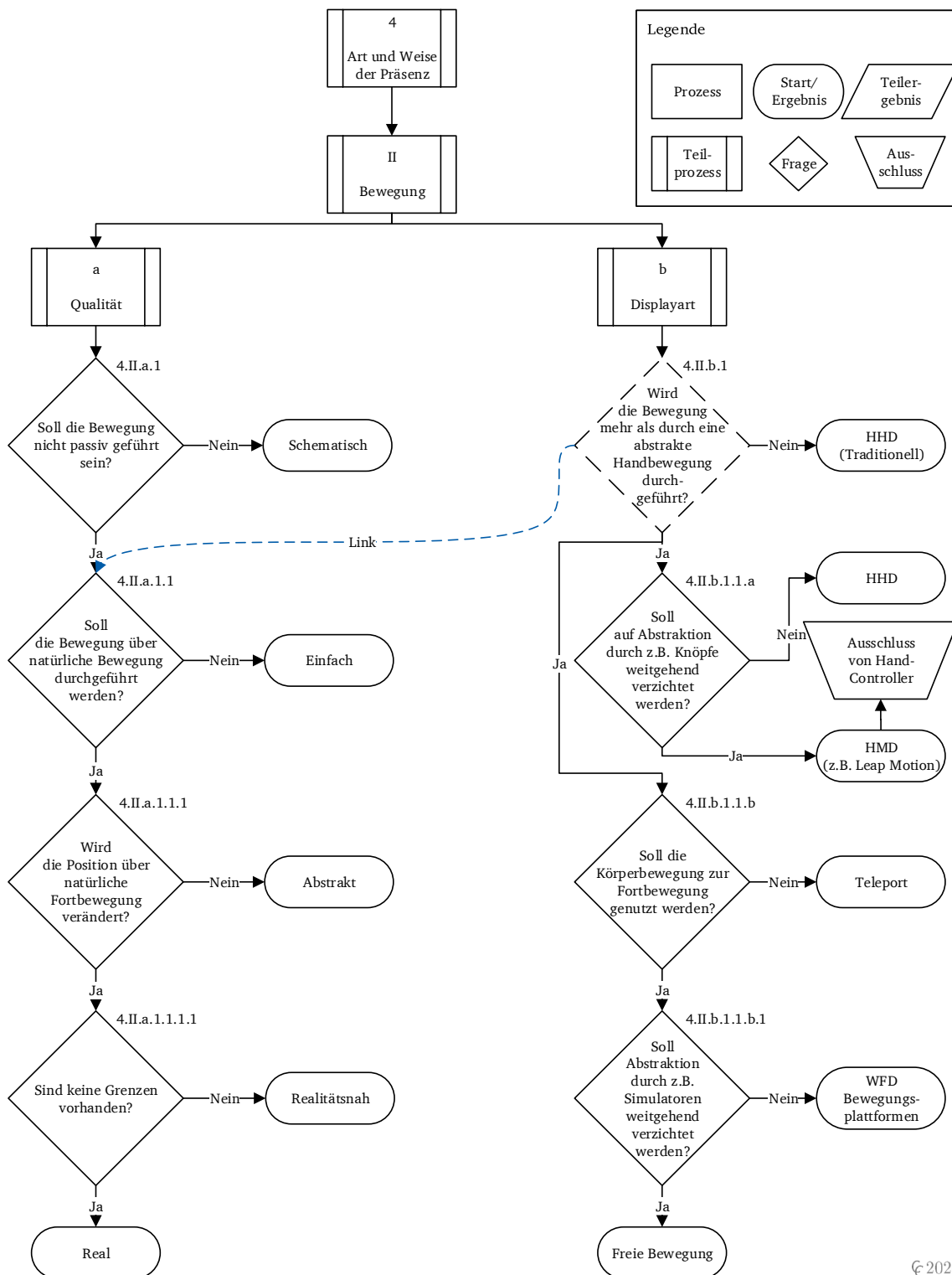
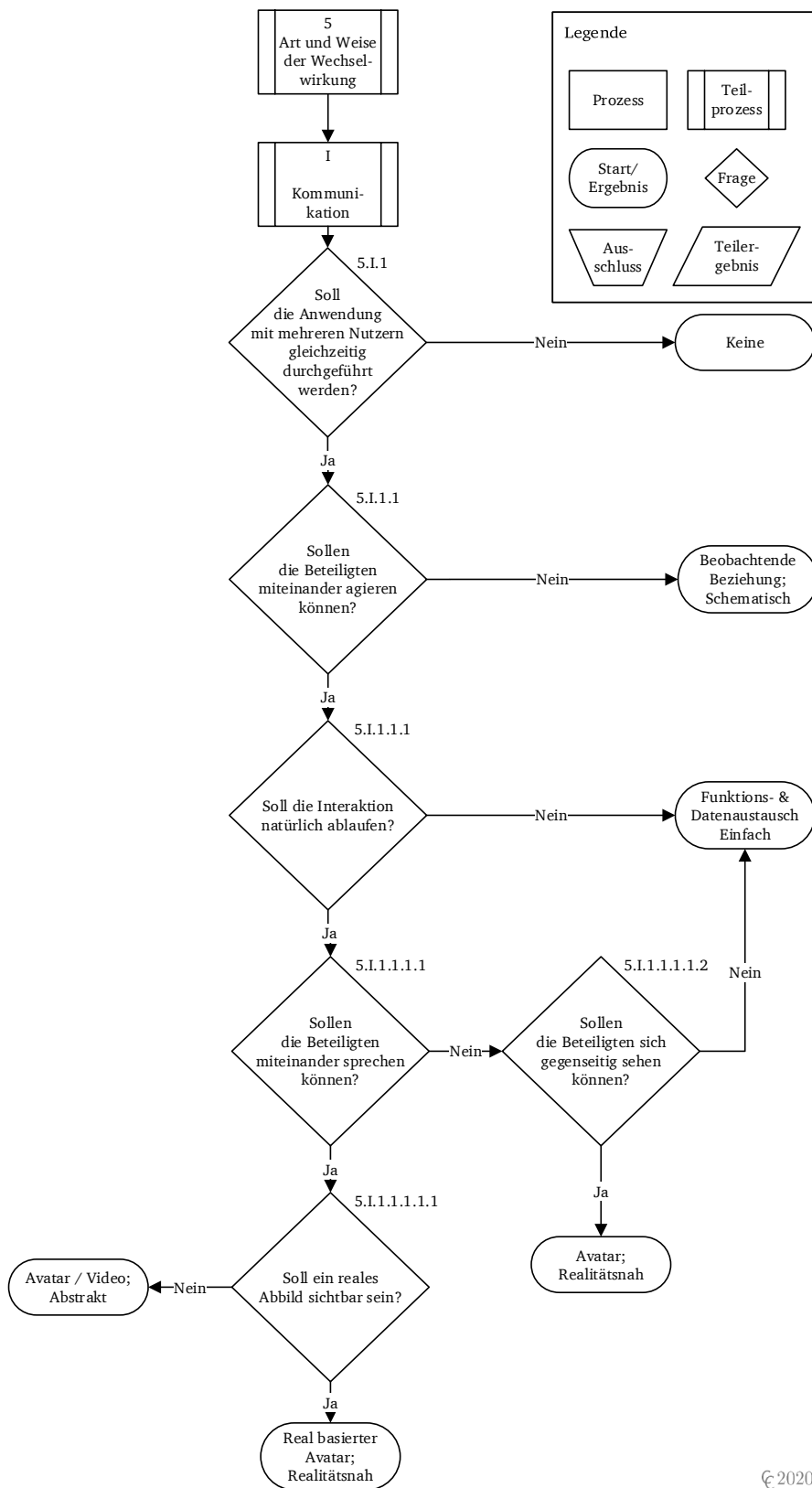


Abbildung 4-13: Handlungsempfehlung Bereich 4 I: Körpergefühl von Tabelle A-13



© 2020

Abbildung 4-14: Handlungsempfehlung Bereich 4 II: Bewegung von Tabelle A-13



© 2020

Abbildung 4-15: Handlungsempfehlung Bereich 5 I: Kommunikation von Tabelle A-13

v) Fragen zur Art und Weise der Wechselwirkung

Die Wechselwirkung im Pan-Faktor beschreibt die Interaktion und die Kommunikation. Interaktion und Kommunikation sind nicht mehr in Qualität und Displayarten zu unterteilen, da es für beide eine zu große Vielfalt an Hardwarelösungen gibt, um diese klar voneinander abgrenzen zu können. Es kann keine klare Selektion der geeigneten Hardware ermittelt werden, weshalb beide Punkte lediglich auf ihre Qualität abgefragt werden.

Fragen im Bereich der Kommunikation

Die Kommunikation ist nicht zwingend notwendig, aber ermöglicht beim Einsatz eine größere Nutzungsmotivation. Die Kommunikation kann sehr vielfältig als reine Bildschirmübertragung, Telefonat, Chat oder Avatar-gestützte Interaktion umgesetzt sein. Eins haben alle Formen gemeinsam und das ist, dass diese im Mehrnutzerbetrieb stattfinden (Frage 5.I.1) (siehe UML-Flussdiagramm Abbildung 4-15). Anschließend werden über die Fragen die definierten Qualitäten (siehe Tabelle 4-10) abgefragt und die geeignete Form selektiert. Daneben werden zusätzliche Informationen gesammelt und z. B. eine Kommunikation in einer Zeiger-Beobachter, Funktions- & Datenaustausch oder Avatar-Gestützten Form erhoben (siehe UML-Flussdiagramm Abbildung 4-15).

Fragen im Bereich der Interaktion

Die Interaktion beruht auf den Human-Computer Interaction, welche im Kapitel 2.2 erörtert worden und deren Qualitätsdefinitionen in Tabelle 4-9 festgehalten worden sind. Anhand dieser Grundlage sind vier Fragen entwickelt und in Tabelle A-13 sowie Abbildung 4-16 festgehalten worden. Die Fragen helfen die Qualität zu ermitteln, wobei die Frage 5.II.1.1.1, ob reale Gegenstände eingebunden werden sollen, nicht gestellt werden muss. Diese ist bereits mit der Medienwahl und somit Frage 2.1.1.1.1 in Tabelle A-13 verbunden. Als Ergebnis erhält man die Qualität und geeignete Displayarten für Interaktion und Kommunikation.

4.3.5 Zusammenfassung des Konzepts für eine Handlungsempfehlung mittels Pan-Faktor

Mit dem Konzept für eine Handlungsempfehlung mittels Pan-Faktor wird auf die Bestandteile des Pan-Faktors zurückgegriffen und erarbeitete Grundlagen zu Displayarten, Technologien und Umsetzungsmöglichkeiten verwendet. Ziel dieser Handlungsempfehlung ist es, basierend auf einem Vergleich mit anderen Anwendungen und der Beantwortung eines dynamischen Fragebogens, eine individuelle Empfehlung zur Umsetzung einer digitalen Ingenieurmethode innerhalb der Digitalen Realität zu erstellen. Das Konzept umfasst einen Fragebogen mit 68 Fragen, welche es ermöglichen problemspezifisch ein geeignetes Medium, Umsetzungsqualität und Displayarten zu finden. Darüber hinaus soll bei der Beantwortung dieser einfach gestalteten Fragen ein grobes Profil erstellt und mögliche Umsetzungsqualitäten in einem fiktiven Pan-Faktor aufgezeigt werden. Es wird demnach dem Anwendenden eine Umsetzungsempfehlung gegeben, die als solche identifiziert werden kann.

Die Definitionen der verschiedenen Qualitäten unterschiedlicher Sinneswahrnehmungen des Pan-Faktors wurden genutzt, um gezielte Fragen und Abhängigkeiten zu entwickeln. Diese ermöglichen eine Dynamik und Reduktion des Aufwands zur Beantwortung von Fragen und schafft Synergieeffekte. Außerdem

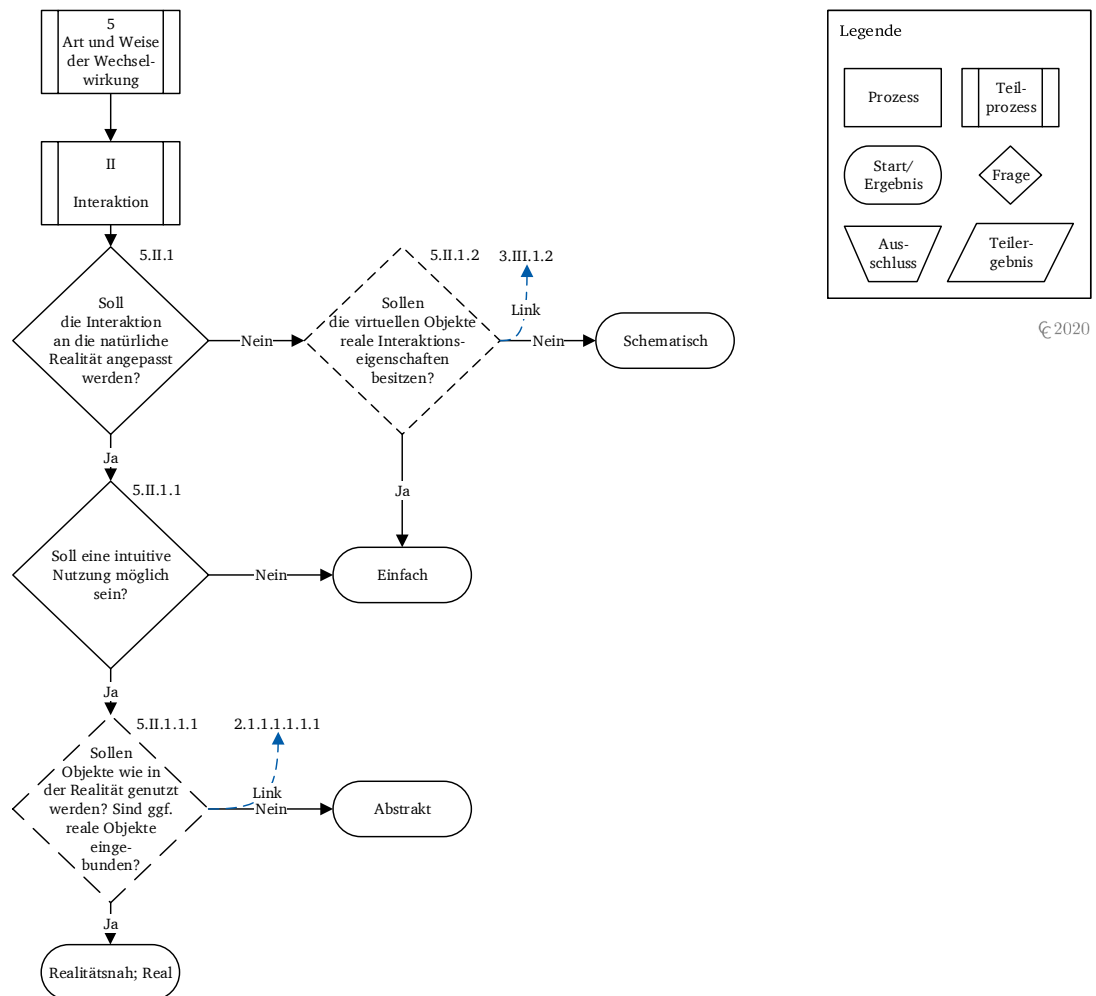


Abbildung 4-16: Handlungsempfehlung Bereich 5 II: Interaktion von Tabelle A-13

stärkt es, wie Abbildung 4-4 veranschaulicht, die Einfachheit und Anwendbarkeit des Pan-Faktors. Mit Hilfe einer solchen Empfehlung soll es dem Ingenieur oder der Ingenieurin möglich sein das ideale Medium und Detailtiefe einer neuen Anwendung, in einer von ihm oder ihr beschriebenen Problematik, entwickeln zu können.

Für die Umsetzung des Konzepts muss die Dynamik des Fragebogens gewahrt bleiben und die Aufbereitung der Empfehlung optisch ansprechend und übersichtlich gestaltet sein. Außerdem muss die Komplexität der verschiedenen Bereiche (Allgemein, Medienfilter, Immersion, Präsenz & Wechselwirkung) abgebildet und deren Verknüpfung zielführend implementiert werden.

4.4 Zusammenfassung des Konzepts

In diesem Kapitel wurde die Idee eines Vergleichsparameters namens Pan-Faktor sowie eine darauf basierende Handlungsempfehlung für Ingenieure und Ingenieurinnen vorgestellt (siehe Abbildung 4-4). Im Fokus der Technologien und Medien, des hier geschaffenen Begriffs der Digitale Realität, ist der Pan-Faktor eine Größe, die den Grad des natürlichen Realismus einer Anwendung und ihrer Hardware ausdrückt. Durch die Bewertung der Faktoren Immersion, Präsenz und Wechselwirkung können fach-

und softwareübergreifend einheitliche Werte ermittelt werden, welche einen Vergleich zwischen den zahlreichen und grundlegend verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten und -bereichen ermöglicht. Der Pan-Faktor ist als Werkzeug gedacht, um das erweiterte Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum (siehe Abbildung 3-2) und die darin enthaltenden Applikationen zu beziffern, sowie eine einheitliche Aussage zum Grad der Immersion, Präsenz und Wechselwirkung treffen zu können. Der Pan-Faktor bewertet diese Einflüsse mit Hilfe eines einheitlichen Schemas, welche in den Qualitäten und Quantitäten der bewertenden Anwendungsdetails ausgedrückt wird. Diese Einheit soll eine einfache Umsetzung und damit ein leichtes Verständnis ermöglichen. Im Rahmen des Konzept sind für den Pan-Faktor die Quantität in Tabelle 4-1, aber auch alle Qualitäten definiert und mit den Kennwerten des Anwendungsbereichs und der Freiheitsgrade belegt worden (siehe Tabelle 4-2, Tabelle 4-3, Tabelle 4-4, Tabelle 4-5, Tabelle 4-6, Tabelle 4-7, Tabelle 4-8, Tabelle 4-9 & Tabelle 4-10). Zum Vergleich der Kennwerte wurden 258 Hardwarekomponenten betrachtet, analysiert und mit deren Freiheitsgrade und Anwendungsbereiche bestimmt.

Mit diesem Faktor sollen Anwendungen bewertet werden können, was im Rahmen der Forschung die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Untersuchungen steigert und aufbauende Analysen leichter ermöglicht. So kann beispielsweise die Fragestellung, ob ein Head-Mounted-Display immersiver als eine CAVE ist, beantwortet werden, ohne dabei die Schwäche zu besitzen, dass die Technologie sehr unterschiedlich, eventuell auf verschiedenen Entwicklungsstufen oder die Anwendung als solche anders ist.

Ist der Pan-Faktor dafür gedacht bereits existierende Applikationen und Hardwaresysteme zu bewerten, so kann seine vergleichende Stärke auch genutzt werden, Qualitäten zukünftiger Entwicklungen zu empfehlen. Mit dieser Idee ist das Konzept für eine ingenieurgerechte Handlungsempfehlung entstanden. Im zweiten Teil dieses Kapitels wird diese Handlungsempfehlung und deren Aufbau erläutert. Diese Empfehlung richtet sich an Ingenieure und Ingenieurinnen, die zur Umsetzung und Lösung eines Ingenieurproblems eine Applikation der Digitalen Realität entwickeln möchten. Für die Machbarkeit und Wahl des richtigen Mediums und zur Empfehlung der geeigneten Qualitäten in Bezug auf das erweiterte Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum (siehe Abbildung 3-2), soll diese Handlungsempfehlung durchgeführt werden. Ebenfalls kann durch eine vorausgegangene Analyse die zu empfehlende Anwendung mit Existierenden der gleichen Kategorie verglichen werden. Die Handlungsempfehlung baut deshalb auf dem Pan-Faktor auf und erweitert dies noch mit der gezielten Filterung des geeigneten Mediums der Digitalen Realität.

Dabei wird das Konzept vorgestellt, die Handlungsempfehlung mittels eines dynamischen Fragebogens durchzuführen und diesbezüglich geeignete Fragen in den Bereichen Medienfilter, Immersion, Präsenz und Wechselwirkung aufgezählt. Eine Dynamik wird erzeugt, indem Synergieeffekte zwischen den Bereichen und somit Fragen genutzt werden. Außerdem wird ein klarer Zusammenhang zwischen den Fragen geschaffen, welcher zusätzlich eine individuelle Folge und Gestaltung zulässt. Diese Komplexität ist in vielen einzelnen UML-Flussdiagrammen aufgezeigt und im Unterkapitel für jeden Abschnitt einzeln erläutert worden.

Mit dem Konzept vom Pan-Faktor und der aufbauenden Handlungsempfehlung können zwei Werkzeuge für Ingenieure und Ingenieurinnen entwickelt werden, welche die Bewertung und Entwicklung bzw. Weiterentwicklung der Software- und Hardwarestrategien im Bereich der digitalen Ingenieurmethoden vereinfacht.

5 Umsetzung des Pan-Faktors und einer Handlungsempfehlung für Ingenieur Anwendungen in der Digitalen Realität

„Eines Tages wird man offiziell zugeben müssen, dass das, was wir Wirklichkeit getauft haben, eine noch größere Illusion ist als die Welt des Traumes.“ - Salvador Dali

Im vorausgegangenen Kapitel wurde das Konzept für einen Vergleichsparameter namens Pan-Faktor vorgestellt. Dieser wurde ebenfalls in einer Handlungsempfehlung benutzt und gezeigt, wie es möglich ist, Applikationen der Digitalen Realität innerhalb der Ingenieurwissenschaften vorzuschlagen. Im folgenden Kapitel geht es darum, dass Konzept des Pan-Faktors und der Handlungsempfehlung umzusetzen. Hierfür müssen geeignete Möglichkeiten zur Darstellung und Übertragung der Komplexität gefunden werden.

Das Ziel der Umsetzung ist es, die Konzepte so zu implementieren, dass die anwendende Person diese einfach und unkompliziert nutzen kann. Ebenfalls sollen die Ergebnisse dauerhaft zur Verfügung stehen, damit diese später im Vergleich zu anderen immer wieder genutzt werden können. Trotz zahlreicher Qualitätsdefinitionen im Pan-Faktor und des komplexen Entscheidungsbaums der Handlungsempfehlung, soll eine schnelle und zielgerichtete Durchführung der Umsetzung möglich sein. Die beschriebene Dynamik des Fragebogens in der Handlungsempfehlung soll genutzt werden, um eine individuelle Abarbeitung zu gewährleisten.

In den folgenden Kapiteln wird die Umsetzung des Pan-Faktors in Form einer Software namens Pan-Meter (siehe Kapitel 5.1), die darauf basierende Analyse von aktuellen Ingenieur Anwendungen (siehe Kapitel 5.2) und die Handlungsempfehlung als Webseite (siehe Kapitel 5.3) detailliert beschrieben.

5.1 Umsetzung des Pan-Faktors

Im folgenden Kapitel soll der Pan-Faktor, wie er in Kapitel 4.2 beschrieben ist, umgesetzt werden. Hierfür müssen die Kennwerte und Definitionen zur Qualität beziffert und die Skala des Pan-Faktors definiert werden (siehe Kapitel 5.1.1). Im Kapitel 4.1 wird der Umgang mit dem Anwendungsbereich und den Freiheitsgraden im Pan-Faktor erläutert. Anschließend wird der Pan-Faktor in einer Excel-Tabellenkalkulation als auch in einer interaktiven Webseite umgesetzt und diese Umsetzung sowie optisches Erscheinungsbild detailliert beschrieben. Es wird damit gezeigt, wie der Pan-Faktor genutzt werden kann, um Anwendungen einfach und schnell zu bewerten.

5.1.1 Der Pan-Faktor als Zahl

Um den Pan-Faktor mit seiner mathematischen Definition aus Formel 4.10 berechnen und damit durch den Vergleich der verschiedenen Werte nutzen zu können, muss eine Bezifferung stattfinden. Die einzelnen Bestandteile der Immersion, Präsenz und Wechselwirkung müssen mit einheitlichen Zahlen ausgedrückt und damit die Qualität und Quantität berechnet werden können. Deshalb wird eine einheitliche Bewertung in einer Schrittweite von 0 bis 5 Pan-Punkte (PP) für jeden Einflussfaktor festgelegt, wie sie in Tabelle 5-1 und Abbildung 5-1 dargestellt ist. Es ist damit eine gleichmäßige Verteilung der einheitlich formulierten Einflussfaktoren umgesetzt.

Tabelle 5-1: Übersetzung der Qualität und Quantität in Pan-Punkte

Pan-Punkte	Quantität	Qualität
0	keine	keine
1	wenig	schematisch
2	einige	einfach
3	viele	abstrakt
4	sehr viele	realitätsnah
5	vollständig	real

Innerhalb des Konzepts wurden die Qualität und Quantität eines jeden Einflussfaktors auf der einheitlichen Einteilung von keine, schematisch, einfach, abstrakt, realitätsnah und real bzw. keine, wenige, einige, viele, sehr viele, vollständig reduziert. Diese jeweils sechs Werte können direkt an die maximalen 5 PP angegliedert werden. In Tabelle 5-1 ist dies festgehalten und so entspricht die schematische Nutzung 1 PP und die reale 5 PP. Bei keinem Einsatz sind die Pan-Punkte in Höhe von 0 anzusetzen. In diesem Fall, wie es auch in den Bedingungen der Formel 4.10 festgehalten ist, kann die Summe der Qualität und Quantität niemals größer als 0 sein. Nur bei der Bewertung von Qualität und Quantität von mehr als einem Pan-Punkt ist die Summe im Pan-Faktor zu berücksichtigen.

Maximal kann demnach für jeden Einflussfaktor innerhalb der Bereiche Immersion, Präsenz und Wechselwirkung 10 PP erreicht werden. Dadurch, dass die Präsenz und die Wechselwirkung aus jeweils zwei Einflussfaktoren bestehen, erreichen diese maximal 20 PP. Die Immersion dagegen erhält durch die reine Bewertung der Qualität und Quantität bereits 50 PP (siehe Abbildung 5-1). Jeder Einflussfaktor wird wie das Konzept vorsieht gleichmäßig bewertet und berücksichtigt. Die Anzahl der genutzten Sinne werden zusätzlich in der Immersion berücksichtigt und erhalten aufgrund der Wichtigkeit der Synergieeffekte einen festgelegten Aufschlagsfaktor von 2 (siehe Formel 4.10). Dadurch sind beim Einsatz von fünf Sinnen zusätzlich 10 PP zu erreichen und die Immersion kommt auf einen Gesamtwert von 60 PP.

Durch die Summierung von Immersion, Präsenz und Wechselwirkung sind maximal 100 PP erreichbar ($60 \text{ PP} + 20 \text{ PP} + 20 \text{ PP} = 100 \text{ PP}$). Diese Skala ist in Abbildung 5-1 veranschaulicht. Die Bevorteilung der Immersion im Pan-Faktor ist gerechtfertigt, da die Immersion mit den meisten Einflussfaktoren, als Grundlage für die Präsenz und als Wert des Realismus wesentlicher Bestandteil im Pan-Faktor ist.

Es ist damit möglich die Definitionen des Konzepts mit Werten zu belegen und einen Pan-Faktor für die

jeweilige Anwendung zu erhalten, welche innerhalb einer Skala von 0 bis 100 PP angibt, wie natürlich real eine Anwendung ist.

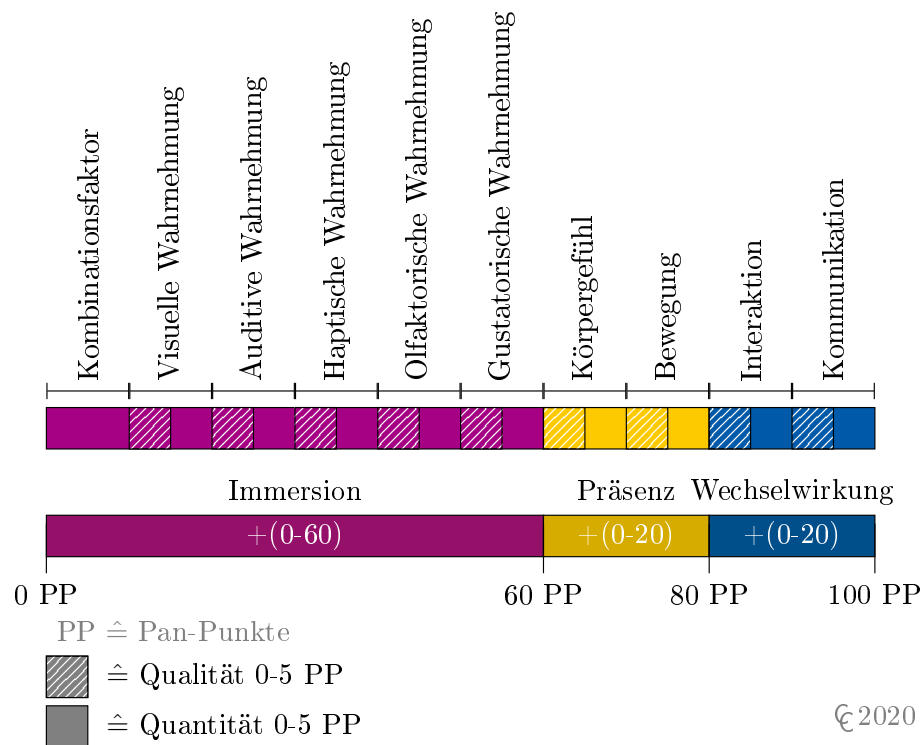


Abbildung 5-1: Pan-Punkte für Immersion, Präsenz, Wechselwirkung und Pan-Faktor

5.1.2 Excel-Tabelle als Pan-Meter

Um die Bewertungsskala einfach und sinnvoll einsetzen zu können, ist es nötig Hilfswerkzeuge ähnlich wie ein Thermometer für Temperaturmessungen umzusetzen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Software namens Pan-Meter zur Messung des Pan-Faktors in Form eines Fragebogens erstellt. Dieser Fragebogen soll eindeutig sein und Fehler durch falsche Eingaben oder Unwissen nach bester Möglichkeit verhindern. Deshalb wurde eine Excel-Tabelle mit Makros und eine intelligente Webseite erstellt. Beide Entwicklungen ermöglichen die schnelle und einfache Bewertung verschiedenster Anwendungen der Digitalen Realität über den Pan-Faktor.

i) Aufbau der Excel-Tabelle

In der ersten Form wurde eine Excel-Tabellenkalkulation (Excel 2016¹) mit Makros umgesetzt. Mit dem Einsatz der Programmiersprache Visual Basic wurde die Excel-Tabelle so gestaltet, dass die nutzende Person über einfache Bedienelemente die Bewertung durchführen kann. Damit ein schlankes Design und die große Informationstiefe gewährleistet werden kann, wurden vier Arbeitsblätter erzeugt. Das erste Blatt Erklärung enthält allgemeine Informationen des Pan-Faktors, ähnlich der aus Kapitel 4.2. Das zweite Blatt Pan-Meter beinhaltet den Fragebogen zur Erstellung des Pan-Faktors für die zu bewertende Applikation

¹ <https://products.office.com/de-de/excel> Aufgerufen am 02.01.2020.

(siehe Abbildung A-2 & Abbildung A-3). Das dritte Arbeitsblatt **Ergebnis** zeigt in einem Diagramm den erreichten Wert des Pan-Faktors mit farblicher Abgrenzung von Immersion, Präsenz und Wechselwirkung (siehe rechts in Abbildung 5-2). Daneben befindet sich in einem tabellarischen Aufbau die detaillierte Bewertung der einzelnen Einflussfaktoren in Qualität und Quantität (siehe links in Abbildung 5-2). Das letzte Arbeitsblatt umfasst alle Definitionen des Pan-Faktors, welche hier im Konzept 4.2 zu finden sind.

ii) Funktionsweise der Excel-Tabelle

Beginnend mit dem ersten Arbeitsblatt kann sich die nutzende Person über den Pan-Faktor informieren, seine Funktion und Einflussfaktoren einsehen sowie seinen Aufbau grob verstehen. Anschließend kann dieser im zweiten Arbeitsblatt durch das Anklicken von Checkboxen und einer gezielten Auswahl innerhalb von Comboboxen die einzelnen Qualitäten bzw. Quantitäten der Einflussfaktoren basierend auf der eigenen Anwendung bewerten (siehe Abbildung A-2 & Abbildung A-3). Durch die festgelegte Auswahl in den Bereichen der Tabelle 5-1 kann dabei keine fehlerhafte Eingabe erfolgen. Bei Auswahl der Checkbox, bestätigt die nutzende Person, ob der jeweilige Sinn oder Einflussfaktor in der Anwendung vorkommt. Ist dies der Fall findet automatisch über Visual Basic die Auswahl der jeweiligen Comboboxen vom Zustand „Keine“ zu „Schematisch“ und „Wenige“ statt. Beim Entfernen des Hakens in der Checkbox wird dies wieder auf den Ursprung zurückgesetzt. Die Excel-Tabellenkalkulation erhält somit mit Makros eine höhere Funktionalität als klassische Tabellenkalkulationen. Das Fehlerpotential wird damit auf ein Minimum reduziert. Bei mangelndem Wissen kann die nutzende Person bei jedem Einflussfaktor auf den Button „Details“ drücken, dadurch wird dieser automatisch an die richtige Stelle in den Qualitätsdefinitionen des vierten Arbeitsblatts weitergeleitet. Diese Details können gelesen und mit dem Button „Zurück“ zur ausgehenden Fragestellung zurückkehrt werden. Die nutzende Person wird so systematisch und linear durch alle drei Einflussfaktoren des Konzepts geführt.

iii) Ergebnis der Excel-Tabelle

Zum Abschluss der Befragung wird die Schaltfläche „Pan-Faktor ermitteln“ betätigt, wodurch die einzelnen textbasierten Qualitäts- und Quantitätsangaben in Zahlenwerte übersetzt und der Pan-Faktor der Anwendung berechnet wird. Anschließend wird die nutzende Person auf das nächste Arbeitsblatt weitergeleitet, wo das Ergebnis visualisiert wird. In der Darstellung in Abbildung 5-2 ist erkennbar, dass die Werte für Immersion, Präsenz und Wechselwirkung nachvollziehbar angezeigt und wie in Formel 4.10 aufsummiert werden. Im Balkendiagramm wird in der Höhe der definierten Skala von 0 bis 100 PP die jeweiligen Einflussfaktoren farblich kenntlich angezeigt und der Gesamtwert ist ablesbar. Diese kann über die internen Funktionen von Excel als Portable Document Format (PDF)-Datei exportieren und damit gesichert und geteilt werden. In der Abbildung 5-2 wurde beispielsweise die Werte des Projekts „VR4Teach“ eingetragen und beispielhaft ausgegeben, um das Ergebnis besser visualisieren zu können.

iv) Umsetzungsergebnis

Der Ablauf ist bewusst linear gestaltet und soll über vordefinierte Auswahlmöglichkeiten die Anforderungen an den Nutzenden reduzieren. Dadurch ist der Umgang des Pan-Meters als Excel-Tabelle einfach

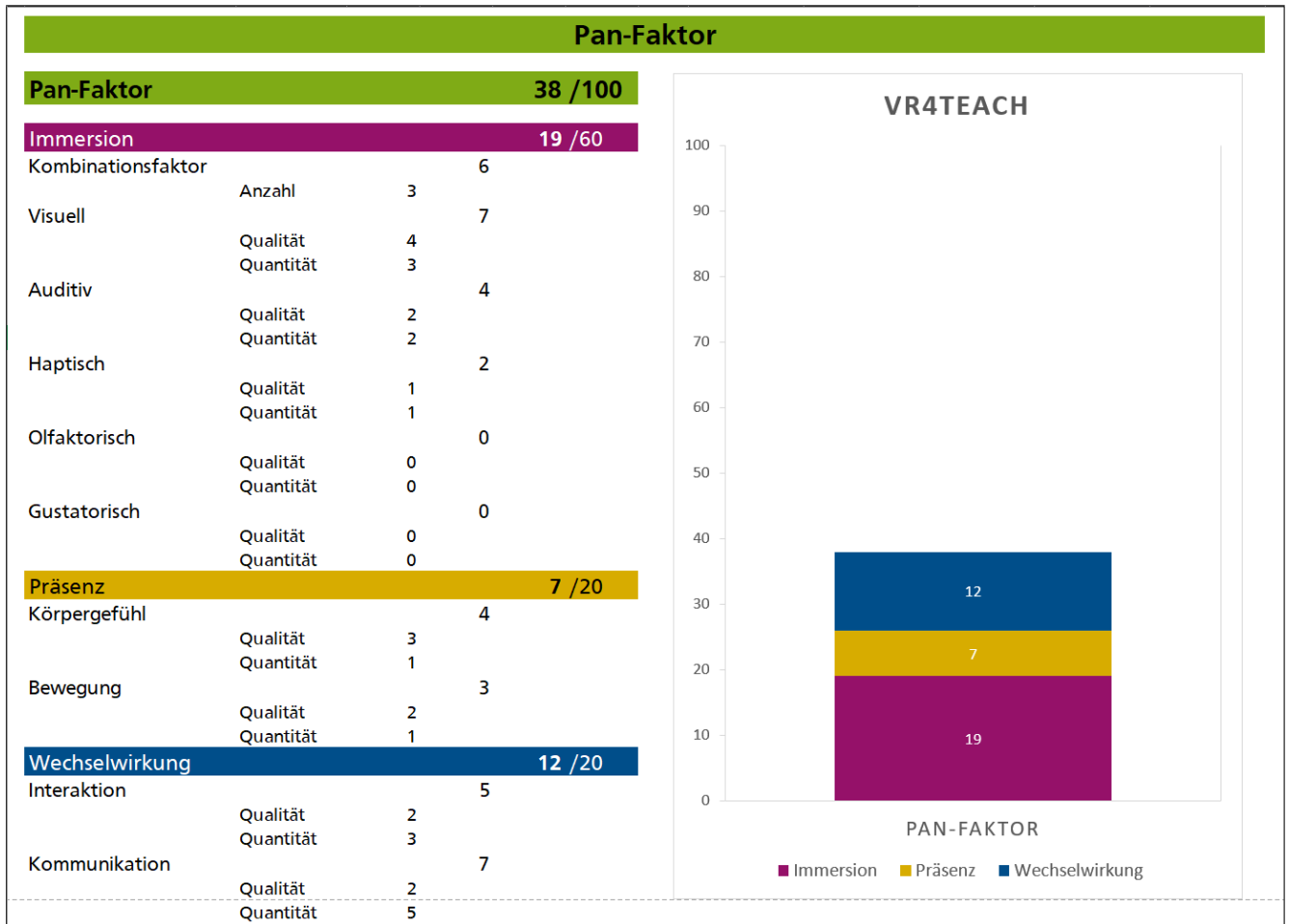


Abbildung 5-2: Ergebnis des Pan-Meters in Form der Excel-Tabellenkalkulation

gestaltet worden. Auch die Möglichkeit über Visual Basic Ansichten und bestimmte Inhalte zu fokussieren, wurde genutzt, um die zahlreichen Informationen in Form der Definitionen übersichtlich aufzubereiten und an den richtigen Stellen zu platzieren. Die Entscheidung eine Excel-Tabellenkalkulation zu benutzen, liegt an dem Umstand das Tabellenkalkulationen ein gängiges Werkzeug in den Ingenieurwissenschaften sind und somit der Umgang damit für viele möglich ist. Außerdem kann gezeigt werden, dass somit eine kleine Anwendung das Konzept des Pan-Faktors umsetzen kann. Ebenfalls wird gezeigt, dass nicht viel notwendig ist, um die eigene Applikation mit Hilfe des Pan-Faktors zu bewerten.

5.1.3 Intelligente Webseite als Pan-Meter

Eine Anwendung mit mehr Funktionalitäten beschreibt das Pan-Meter als Webseite. Hier können weitere Funktionalitäten und Vorteile der Webprogrammierung genutzt werden, um das Ziel eines einfachen und schlanken Werkzeugs zur Bestimmung des Pan-Faktors zu erreichen.

Hierfür wurde Angular CLI² in der Version 8.3.21, Angular³ in Version 8.2.14, sowie Node.js⁴ in Version 10.16.0 zum Aufbau der Basiselemente verwendet. Daneben wurde das von Google zur Verfügung

² <https://cli.angular.io/> Aufgerufen am 02.01.2020.

³ <https://angular.io/> Aufgerufen am 02.01.2020.

⁴ <https://nodejs.org/en/> Aufgerufen am 02.01.2020.

gestellte Design Angular Material⁵ zur Umsetzung der graphischen Oberfläche genutzt und sich an die Vorgaben der Designvorlage gehalten. Bei der Darstellung von Diagrammen wurde Google Charts⁶ mit der Google Visualization API eingesetzt. Für den Import von Comma Separated Values (CSV)-Dateien wird die Javascript Bibliothek Papa Parse⁷ in Version 5.1.1. genutzt. Zur automatischen Generierung von PDF-Dateien als Ergebnisoutput wurde die Node.js-Bibliothek PDFMake⁸ in Version 0.1.63 verwendet. Es wurde die Programmiersprache Javascript und Typescript zur Umsetzung aller Bestandteile im Backend und die Hypertext Markup Language (HTML) für das Frontend verwendet.

i) Der Aufbau der Webseite

Der Aufbau der Anwendung lässt sich in vier große Teile einteilen und ist in Abbildung 5-3 vollständig visualisiert.

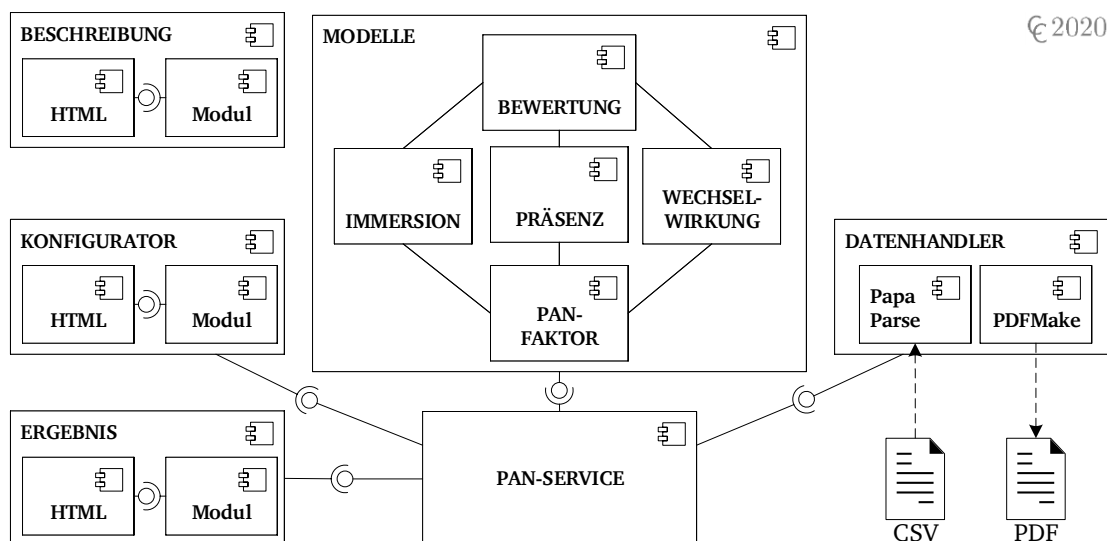


Abbildung 5-3: UML-Komponentendiagramm für das Pan-Meter

Der Erste beschreibt mit den Komponenten der Beschreibung, des Konfigurators und des Ergebnisses die HTML-Seiten als graphische Nutzerschnittstelle für den Anwendenden (siehe links in Abbildung 5-3). Diese werden genutzt, damit die anwendende Person mit der Applikation interagieren kann und Informationen bzw. Fragen visualisiert bekommt. Diese Komponenten bestehen jeweils aus einer HTML-Seite, welche auf dem Design Angular Materials⁵ beruhen. Dadurch wird ein einheitliches und ansprechendes Design umgesetzt. Außerdem stehen damit Standardbauteile wie Buttons, Progressbars, Radio Buttons, Tooltips, u.ä. mit voreingestelltem Design und Animationen zur Verfügung. Es wurden lediglich Farbschemata und Abstände angepasst, um den ausgewählten Farben des Pan-Faktors zu entsprechen. Jede HTML-Seite ist mit einem gleichnamigen Modul verknüpft, welches die Logik und Funktionalität der

⁵ <https://material.angular.io/> Aufgerufen am 02.01.2020.

⁶ <https://developers.google.com/chart> Aufgerufen am 02.01.2020.

⁷ <https://www.papaparse.com/> Aufgerufen am 02.01.2020.

⁸ <http://pdfmake.org/> Aufgerufen am 02.01.2020.

Seite beinhaltet. Hier werden beispielsweise Comboboxen mit Auswahlmöglichkeiten befüllt und Vorauswahlen getroffen. Daneben beinhalten die Module die Verknüpfung zum Pan-Service und somit zu allen Funktionalitäten dieser Anwendung.

Die Beschreibung enthält wie auch in der Excel-Tabellenkalkulation einen allgemeinen Informationstext zum Pan-Faktor. Der Konfigurator beinhaltet alle Bewertungsmöglichkeiten zu allen Einflussfaktoren des Pan-Faktors. Das Ergebnis bereitet den ermittelten Wert und die jeweiligen Einzelwerte ähnlich der Excel-Tabellenkalkulation als Tabelle und Balkendiagramm auf. Daneben werden zusätzlich Texte zum Vergleich mit anderen Anwendungen der gleichen Kategorie angezeigt und im Balkendiagramm eingeblendet (siehe Abbildung 5-7).

Der zweite wesentliche Bestandteil der Webseite sind die Modelle, welche in Typescript umgesetzt wurden. Diese geben das Schemata des Pan-Faktors als Modell wieder. Basierend auf einem allgemeinen Schema **Bewertung**, setzt sich der Pan-Faktor wie im Konzept vorgesehen aus der Immersion, Präsenz und Wechselwirkung zusammen. Das Schema zur Bewertung enthält die Attribute für Qualität und Quantität als Text und Zahl. Die anderen Einflussfaktoren verwenden dieses Basismodell, um alle Sinneswahrnehmungen, das Körpergefühl, die Bewegung, die Kommunikation und Interaktion umzusetzen. Somit weiß beispielsweise das Immersionsmodell, dass es ein Attribut namens auditive Wahrnehmung besitzt, welches eine Qualität und eine Quantität enthält. Das Ganze schließt sich im Modell des Pan-Faktors, welcher neben den Attributen der Einflussfaktoren noch die Attribute des eigentlichen Wertes für den Pan-Faktor beinhaltet, aber auch die zugehörige Kategorie und den Namen der Anwendung.

Diese Modelle werden im Pan-Service verwendet und somit mit den wesentlichen Webseiten des Pan-Meters und des Ergebnisses verknüpft. Der Pan-Service existiert über die gesamte Laufzeit der Anwendung und beinhaltet die wesentlichen Funktionalitäten der Applikation (siehe Mitte unten in Abbildung 5-3). Dieser befüllt die Modelle mit den ausgewählten Werten des Nutzens in Echtzeit und berechnet anschließend den Pan-Faktor. Ebenfalls führt der Pan-Service den Vergleich mit anderen Ingenieur Anwendungen der Digitalen Realität durch und bereitet diese als Text und Graph auf, um sie im Ergebnis visualisieren zu können. Für den Vergleich, aber auch für die Möglichkeit eines Exports als PDF tauscht der Pan-Service zusätzlich mit dem Datenhändler die Daten aus.

Der vierte Bestandteil der Applikation ist der Datenhändler (siehe rechts unten in Abbildung 5-3). Dieser ist für Import und Export zuständig und gibt die importierten oder exportierten Daten weiter. Für den Import wurde das CSV-Dateiformat gewählt. Innerhalb der Applikation werden alle Definitionen der Qualität und Quantität, wie sie im Konzept Kapitel 4.2 beschrieben sind, über diese Schnittstelle eingelesen. Dies ermöglicht die einfache Anpassung auch im Nachhinein, da lediglich der Wert in der Tabelle der CSV-Datei aktualisiert werden muss. Innerhalb kurzer Zeit werden somit die zahlreichen Inhalte eingelesen und über die Hilfsbibliothek Papa Parse⁷ als JSON-Objekt dem Pan-Service zur Verfügung gestellt. Das JSON-Objekt ermöglicht eine einfache objektbasierte Handhabung der großen Datenmengen und den leichten Zugriff auf einzelne Bestandteile dieser. Diese Informationen werden genutzt, um das schlanke Design der Applikation mit der nötigen Informationstiefe auszustatten. Hierfür werden in den HTML-Seiten sogenannte Tooltips eingefügt. Dies sind Hinweismeldungen, die nur beim Mouseover⁹ über ein bestimmtes Element erscheinen und nur solange verweilen wie der Mauszeiger sich auf dem Darstellungsobjekt befindet. Somit kann innerhalb jeder Combobox für die jeweilige Qualität in einem

⁹ Wenn die Maus auf einem Element verweilt ohne dies aktiv ausgewählt zu haben, können zusätzliche Inhalte eingeblendet werden.

Tooltip die ausführliche Beschreibung hinterlegt und für den Nutzenden strukturiert sichtbar gemacht werden. Dies ist in Abbildung 5-4 in einem Screenshot der Anwendung erkennbar.



Abbildung 5-4: Beispiel eines Tooltips mit Informationen zur Definition

Diese Daten werden beim Start der Webseite einmalig geladen und stehen dann zur gesamten Laufzeit zur Verfügung. Neben diesen Daten werden ebenfalls Ingenieur Anwendungen, die im Rahmen dieser Arbeit mit dem Pan-Faktor bewertet wurden (siehe Kapitel 5.2 & Tabelle A-11), mit der zugehörigen Kategorie (Ausbildung, Planung, Ausführung & Betrieb im Bau- und Umweltwesen) sowie dem Pan-Faktor und seine Einflussfaktoren über das CSV-Format eingelesen. Diese Daten sind wichtig, um bei der Berechnung des Pan-Faktors im Pan-Service diesen mit den Ingenieur Anwendungen der gleichen Kategorie vergleichen zu können und dem Nutzenden diesen im Graphen und Text aufbereiten zu können (siehe Kapitel 5.2).

Neben dem Import von CSV-Dateien ermöglicht der Datenhändler mit der Hilfsbibliothek PDFMake⁸ auch den Export von PDF-Dateien. Dieser wird genutzt, um die Ergebnisse der Ermittlung im Pan-Service schriftlich und graphisch festzuhalten und den Anwendenden über die Nutzung der Applikation hinaus zur Verfügung zu stellen. Diese vier Bestandteile ermöglichen in Echtzeit eine Berechnung des Pan-Faktors und liefern eine schlanke Oberfläche mit großer Informationstiefe.

ii) Die Funktionsweise der Webseite

Die Funktionsweise und der Ablauf sind linear, um den Nutzenden klar und verständlich durch die Applikation zu führen. Beginnend mit der ausklappbaren Beschreibung kann die anwendende Person diese lesen oder direkt zum nächsten Abschnitt des Pan-Meters weiter springen. Mit Hilfe der sogenannten Stepper wird Schritt für Schritt der Anwendende für jeden Einflussfaktor einzeln aufgefordert die Qualität und Quantität innerhalb der zu bewertenden Anwendung anzugeben (siehe Abbildung 5-5). Dafür stehen die Auswahlmöglichkeiten der Comboboxen zur Verfügung, welche mit den Tooltips in ihrer In-

formationstiefe angereichert sind. Durch die vordefinierte Auswahl ist eine fehlerhafte Eingabe nicht möglich. Wie in Abbildung 5-6 zu sehen, wird jede Auswahl unmittelbar in das Pan-Faktor-Modell eingespielt.

Der Pan-Faktor ist eine Bewertungsskala für Anwendungen der digitalen Realität (2D, 3D, 360°, AR, VR, XR).

Was ist der Pan-Faktor?

Konfigurator

Demonstration laden

Neu laden

Ermitteln Sie mit Hilfe des Konfigurators den Pan-Faktor Ihrer Anwendung. Mit Hilfe des Schritt-für-Schritt-Konfigurators kommen Sie schnell zu einem optimalen Ergebnis.

1 Körpergefühl

2 Bewegung im Raum

3 Präsenz

4 Wechselwirkung

Alles in Ordnung

Welche Sinnesarten bespielt Ihre Anwendung?

Keine

Qualität wählen

Keine

Quantität wählen

Keine

Weiter

Zurück

Weiter

Pan-Faktor ermitteln

Ergebnis für Anwendungsbeispiel

Führen Sie den Konfigurator aus, um den Pan-Faktor Ihrer Anwendung zu ermitteln

Impressum

Datenschutzerklärung

Entwickelt im Rahmen der Dissertation von Christian Eller M.Sc. 2019/2020

Abbildung 5-5: Screenshot des geführten Fragebogens des Pan-Meters

Ist dieses fertig, kann die nutzende Person den Pan-Faktor der Anwendung ermitteln lassen. Automatisch wird dieser nach der Formel 4.10 berechnet und über den Datenhändler die vergleichbaren Ingenieur Anwendungen eingelesen (siehe Abbildung 5-6). Es sind 102 Ingenieur Anwendungen mit dem Pan-Faktor bewertet worden, welche hier nun als Vergleich zur Verfügung stehen (siehe Kapitel 5.2). Diese werden im Pan-Service verwendet und anhand des Minimums, Maximums und Durchschnitts ein Vergleichstext formuliert. Mit dem Pan-Faktor wird dieser zur Komponente des Ergebnisses gesendet, welche diese in einem Balkendiagramm und Tabelle anzeigt. Neben dem eigentlichen Pan-Faktor der Anwendung, werden im Balkendiagramm das Maximum, das Minimum und der Durchschnitt der vergleichenden Applikationen eingeblendet (siehe Abbildung 5-7). Dies wird ebenfalls als Text ausgegeben. Die nutzende Person erhält somit die Möglichkeit die bewertete Anwendung einzuordnen. Dabei ist das Diagramm dynamisch und reagiert beim Mouseover mit näheren Informationen zu dem Abschnitt. So wird beispielsweise die genauen Pan-Punkte der Immersion in einem Tooltip dargestellt, wenn sich der Mauszeiger im Bereich der Immersion befinden (siehe Abbildung 5-7).

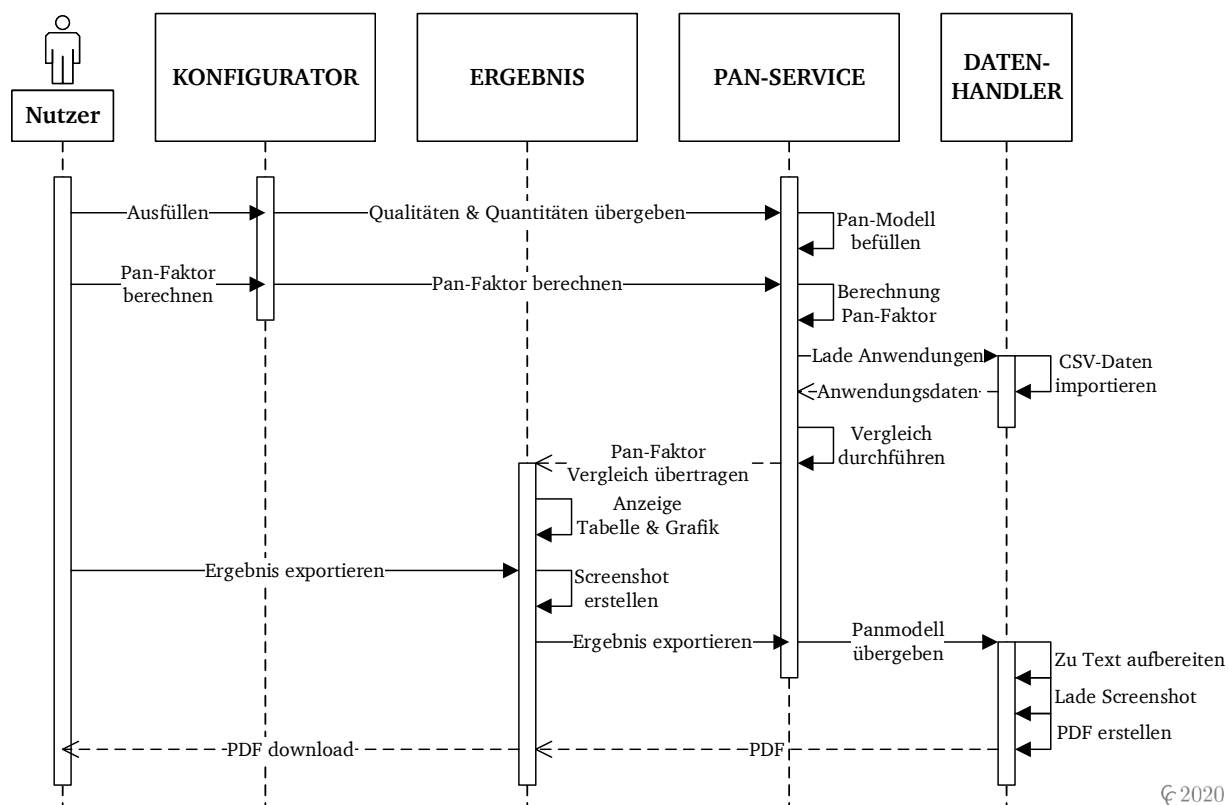


Abbildung 5-6: UML-Sequenzdiagramm zur Erstellung des Pan-Faktors & Exports

Dieses Ergebnis kann nun vom Anwendenden betrachtet oder als PDF exportiert werden. Bei Betätigen der entsprechenden Schaltfläche, erstellt die Komponente des Ergebnisses einen Screenshot des Diagramms und gibt diesen für den Pan-Service frei. Der Pan-Service übermittelt den Screenshot und das Modell des Pan-Faktors an den Datenhändler. Dieser wiederum bereitet die Daten als Text auf und fügt diesen mit dem Screenshot einem automatisch erstellten Dokument zur Verfügung. Anschließend wird

dieses Dokument an den Anwendenden zurückgesendet und automatisch über den Web-Browser zum Herunterladen angeboten.

iii) Das Ergebnis der Webseite

Ähnlich wie bei der Excel-Tabellenkalkulation wird der Pan-Faktor der Anwendung in einer Tabelle mit allen Details zur Immersion, Präsenz und Wechselwirkung und deren Bewertung angezeigt. Ebenfalls existiert das gleiche Balkendiagramm mit den eingefärbten Bereichen der Einflussfaktoren und der Möglichkeit den Pan-Faktor abzulesen (siehe Abbildung 5-7). Dieses ist allerdings im Vergleich zur Tabellenkalkulation interaktiv und so kann über das Klicken einzelner Punkte, Bereiche oder Linien die genauen Werte und Bezeichnung ausgelesen werden (siehe Tooltip im Balkendiagramm Abbildung 5-7). Außerdem wurde das Balkendiagramm mit den Informationen des Vergleichs erweitert. Es finden sich eine durchgezogene grüne Linie für den Durchschnittswert, sowie zwei gepunktete Linien (\triangle - - \triangle) für das Minimum und Maximum. Dadurch wird einfach ersichtlich in welchem Bereich sich die bewertete Anwendung befindet und ob gegebenenfalls Verbesserungen Sinn machen würden.

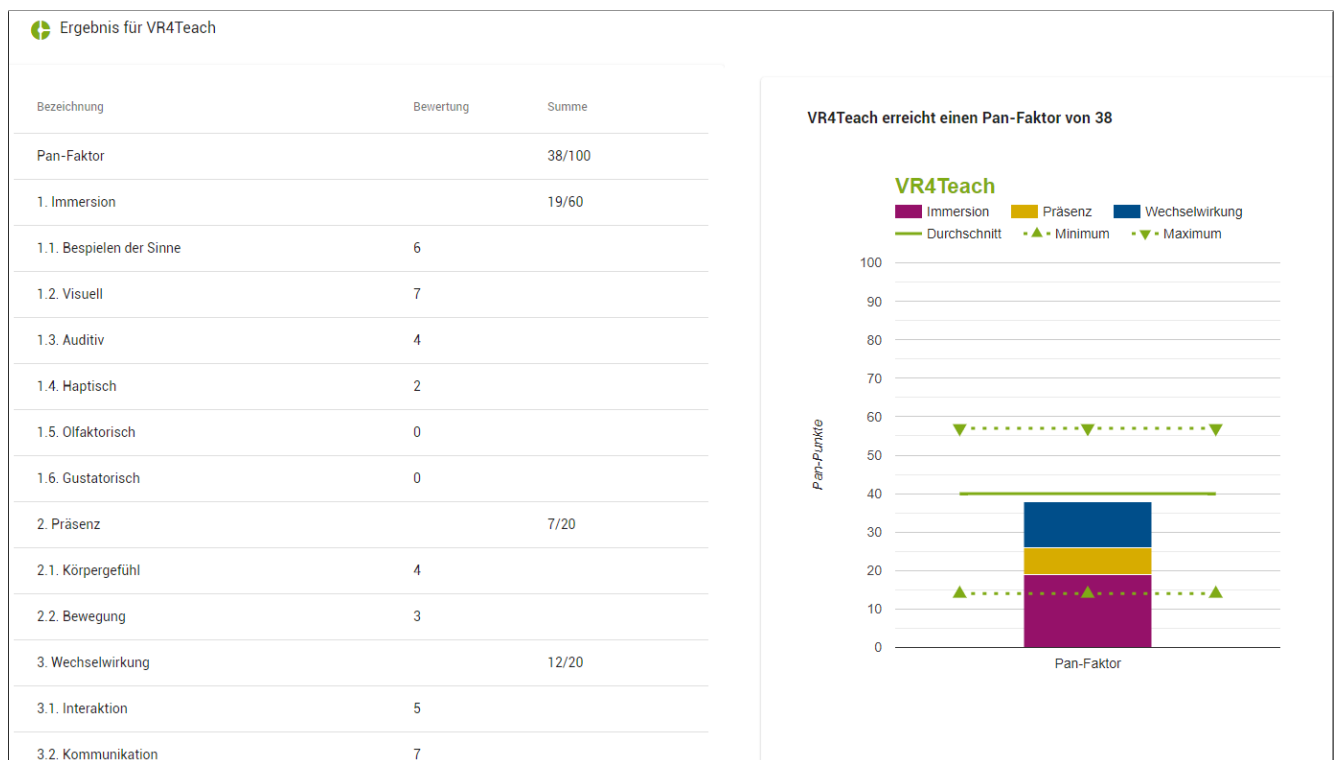


Abbildung 5-7: Darstellung des Ergebnisses des Pan-Meters in der Webseite

Dies wird ebenfalls als Prosa unter der Tabelle angezeigt. Ein Ergebnistext kann beispielsweise so lauten:

Die Anwendung „VR4Teach“ erreicht in der Kategorie „Ausbildung“ einen durchschnittlichen Wert von 38 PP. Die Anwendung „VR4Teach“ liegt damit im Bereich der meisten Ingenieur Anwendungen der Digitalen Realität. Die Graphik zeigt den Anteil an Immersion (19 PP) in lila, in gelb die Präsenz (7 PP) und den Anteil der Wechselwirkung (12 PP) in blau an. Daneben kann die Anwendung mit anderen der Digitalen Realität im gleichen Bereich vergli-

chen werden. Es sind 33 Anwendungen im Bereich „Ausbildung“ hinterlegt. Hier beträgt der durchschnittliche Pan-Faktor 40 PP. Das Maximum liegt bei 57 PP und das Minimum bei 14 PP (Gestrichelte grüne Linien).¹⁰

Darunter befinden sich detaillierte Erläuterungen für die Einflussfaktoren Immersion, Präsenz und Wechselwirkung mit den gewählten Qualitäten. Dabei werden die Definitionen des Pan-Faktors aus dem Anhang über den Import als CSV-Datei genutzt, um diese je nach Auswahl einzufügen. So entsteht ein individueller Text basierend aus der Eingabe des Nutzenden. Dieses Ergebnis kann vollständig exportiert werden. Dabei werden das Balkendiagramm, die Detailtabelle und die Prosatexte in die PDF übernommen. Ein vollständiges Beispiel anhand des Projekts VR4Teach ist im Anwendungsbeispiel in Kapitel 6.2 und im Anhang ersichtlich (siehe Abbildung A-4, Abbildung A-5 & Abbildung A-6).

iv) Umsetzungsergebnis

Mit Hilfe des Schritt-für-Schritt-Aufbaus ist eine lineare Führung durch die Bewertung möglich. Mit vordefinierten Auswahlmöglichkeiten und dem Einsatz von Tooltips ist eine umfangreiche, aber schlanke Anwendung umgesetzt, die die Anforderungen an den Anwendenden auf ein Minimum reduzieren. Die dynamischen Elemente fokussieren die wesentlichen Inhalte in den Blickwinkel des Betrachters. Demnach sind ein einfacher Umgang und Durchführung des Pan-Faktors in einer Pan-Meter umgesetzt worden.

Die Stärken einer in Echtzeit-gerenderten Webseite konnten genutzt werden, um Daten schnell und verlustfrei zwischen den Komponenten zu übertragen. Ebenfalls konnten Ergebnisse interaktiv und Informationstiefen kontextsensitiv aufbereitet werden. Das Nutzererlebnis steigt und das Verständnis von Pan-Faktor und dem Vergleich mit anderen Anwendungen ist übersichtlich visualisiert worden.

5.1.4 Umgang mit dem Abweichungsfaktor $\Delta\delta$

Sind die Quantität und alle Qualitäten der Einflussfaktoren des Pan-Faktors innerhalb des Konzepts in Kapitel 4.2 genau definiert, so lässt sich $\Delta\delta$ in Formel 4.10 nicht allgemeingültig ausdrücken. Es wird zwar in Kapitel 4.2.4 der Abweichungsfaktor und der Einfluss auf die Präsenz beschrieben, doch sind die Ursachen und Gründe, wie die Recherche ergeben hat, nicht klar, eindeutig und allgemeingültig ermittelbar. Es gibt, wie auch in Tabelle 2-1 dargestellt, Forschungsergebnisse, dass Head-Mounted-Displays vermehrt Cybersickness verursachen und bei langer Nutzungsdauer Nebeneffekte auftreten können. Diese Ergebnisse beziehen sich aber auf Head-Mounted-Displays im Prototyp-Status und somit können keine einheitlichen Aussagen alle Nutzenden und Anwendungen betreffend gemacht werden. Es zeigt sich erneut die fehlende Forschung und einheitliche vergleichbare Beschreibung.

Es lässt sich festhalten, dass $\Delta\delta$ eine Reduktion des Pan-Faktors verursachen kann. Aufgrund der mangelnden Forschungsgrundlage und Erkenntnisse im Bereich der Störung von Präsenz und Ursachen von Cybersickness (siehe Kapitel 2.3.5) ist zum aktuellen Stand der Faktor im Pan-Meter nicht wiederzufinden. Es können keine eindeutigen Bewertungskriterien festgelegt werden, welche $\Delta\delta$ verursachen können und somit wird dieser weder in der Excel-Tabellenkalkulation noch in der intelligenten Webseite

¹⁰ Dieser Text beruht bereits auf Ergebnissen des Vergleichs mit anderen Ingenieur Anwendungen, welcher erst im nächsten Kapitel ausführlich beschrieben ist.

angewendet. Dennoch ist es wichtig, dass es den Abweichungsfaktor gibt, um zukünftig die Einflüsse von Präsenzstörung und Cybersickness mit aufnehmen zu können.

5.1.5 Zusammenfassung zum Pan-Meter

In diesem Kapitel wurden zwei unterschiedliche Wege vorgestellt, um den Pan-Faktor über einfache Eingabemöglichkeiten basierend auf den Definitionen des Konzepts als Pan-Meter umzusetzen. Zum einen erfolgte die Implementierung als Excel-Tabellenkalkulation mit Makros und zum anderen als Webseite für eine Plattformunabhängige Lösung. Beide Anwendungsmöglichkeiten führen den Anwendenden linear durch die benötigten Abfragen und ermöglichen eine Auswahl basierend auf den definierten Qualitäts- und Quantitätsmerkmalen aller Einflussfaktoren des Pan-Faktors. Anschließend berechnen diese den Pan-Faktor und präsentieren das Ergebnis in einer detaillierten Tabelle sowie einer graphischen Übersicht in Form eines Balkendiagramms in einfacher und verständlicher Form. Zusätzlich führt der Pan-Meter als Webseite einen Vergleich mit anderen Ingenieur Anwendungen durch und bereitet diesen als Prosa und als Einbindung in das Balkendiagramm auf (siehe Abbildung 5-7). Damit kann die anwendende Person die Applikation direkt mit anderen vergleichen und Potentiale bzw. den Stand der Technik erkennen. Durch die Funktionalität innerhalb von Excel oder der hier umgesetzten Lösung in der Webseite können diese Ergebnisse ebenfalls als PDF-Dokument exportiert und somit über die Lebensdauer des Pan-Meters verwendet werden.

Innerhalb dieses Kapitels konnte die Umsetzung des Pan-Meters mit unterschiedlichen Technologien erfolgreich aufgezeigt werden. Dabei ist durch den Einsatz der objektorientierte Programmierung und des Imports vergleichender Analyseelemente eine spätere Anpassung oder Änderung von Konzepten bzw. Definitionen leicht möglich. Ebenfalls wird durch die Verwendung von Design-Richtlinien eine ansprechende und verständliche Bedienoberfläche geschaffen, die dem Anwendenden einen leichten Zugang ermöglicht. Fehler durch mangelndes Wissen oder fehlerhafte Eingabe des Nutzens konnten durch Auswahl und detaillierter Beschreibung auf ein Minimum reduziert werden und damit den Zeitaufwand verringern. Es wird damit ermöglicht, dass jeder Ingenieur oder Ingenieurin die entwickelte Anwendung schnell und einfach mit dem Pan-Faktor bewerten kann. Insgesamt ist somit ein Werkzeug geschaffen worden, welches mit wenigen Schritten einen aussagekräftigen Pan-Faktor der eigenen Anwendung ermitteln und vergleichen kann.

5.2 Bewertung ingenieurtechnischer Anwendungen der Digitalen Realität

Das Konzept des Pan-Faktors sieht vor, dass Ingenieur Anwendungen im Bereich der Digitalen Realität miteinander verglichen werden können. Dieser Vergleich ermöglicht die Einsortierung in den Gesamtzusammenhang, und dadurch die Grundlage für eine einheitlichen Forschung und Entwicklung. Außerdem ist der Vergleich ein Teil des Pan-Meters in Kapitel 5.1, um die eigene Anwendung in bestehende Eingliedern zu können und damit Abweichungen ersichtlich zu machen. Des Weiteren ist der Vergleich ein wesentlicher Bestandteil der Handlungsempfehlung. Innerhalb dieses Kapitels soll die durchgeführte Sammlung, Analyse und Vergleich verschiedener Ingenieur Anwendungen im Bereich der Digitalen Realität beschrieben werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden 102 Ingenieur Anwendungen betrachtet und basierend auf der Produktbeschreibung, Demovideo, u.ä. der Pan-Faktor bestimmt. Die Sammlung aller Anwendungen mit Beschreibung der Dokumentationsqualität, Kategorie der Ingenieurwissenschaften, Digitale Realität, Quellverweis und Produkt bzw. Forschungsgrad kann der Tabelle A-10 und die Zusammensetzung sowie den Wert des Pan-Faktors Tabelle A-11 entnommen werden. Dazu sind im Literaturverzeichnis für die meisten Applikationen Links für YouTube-Videos hinterlegt.

5.2.1 Parameter der Analyse

Die Applikationen wurden im Bereich der Digitalen Realität mit dem Schwerpunkt von VR-, Erweiterte Virtualität-, AR- und Mixed-Reality-Anwendungen gesucht und ausgewählt. 2D- und 3D-Anwendungen wurden bewusst vernachlässigt, da aufgrund der bereits fortgeschrittenen Entwicklung von z. B. CAD-Systemen und der langen Existenz dieser Softwaremöglichkeiten die Anzahl an Applikationen unüberschaubar groß ist. Eine Aufzählung ist deshalb im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Dennoch wurden sieben 3D-Anwendungen erfasst, da diese bzw. die virtuelle Umgebung fälschlicherweise als VR-Anwendung bezeichnet worden sind [146], [174], [175], [183], [228], [253], [360].

Die Applikationen wurden in Veröffentlichungen mit dem Kontext von VR-, Erweiterte Virtualität-, AR- und Mixed-Reality-Anwendungen und Ingenieur Tätigkeiten in den Kategorien Ausbildung bzw. Planung, Ausführung und Betrieb bzw. Wartung im Bau- und Umweltwesen mit den folgenden Begriffen in Google Scholar¹¹, im App Store¹² und im Google Play Store¹³ in unterschiedlichen Kombinationen gesucht.

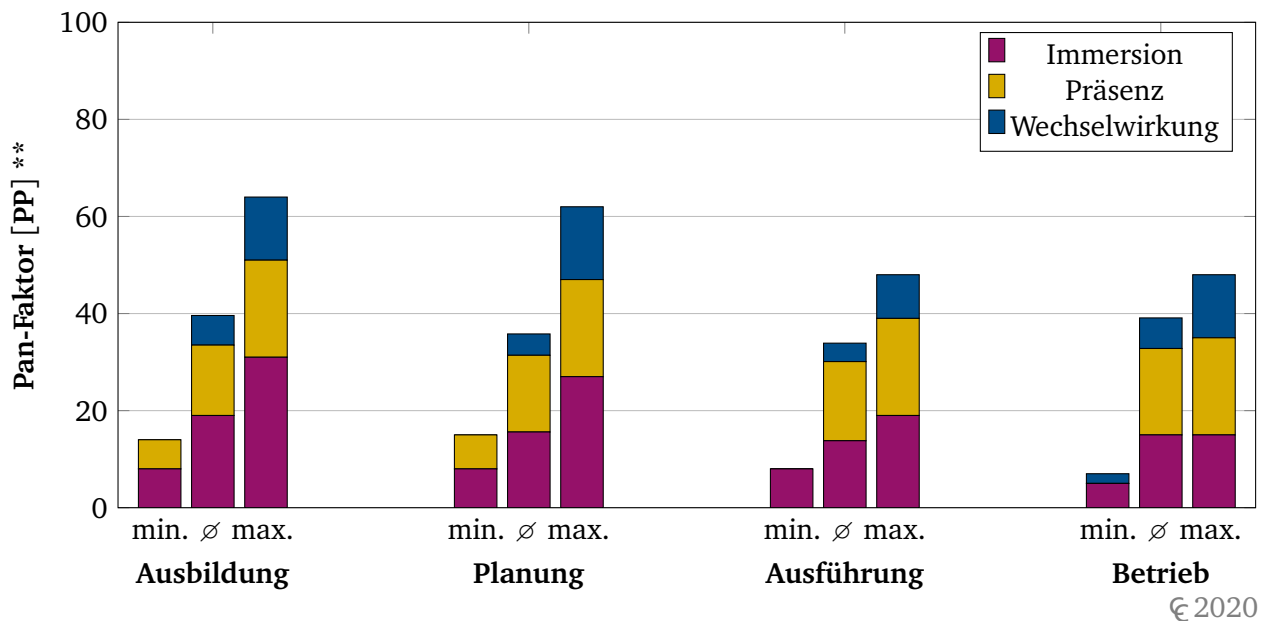
- | | |
|-------------------------------------|---|
| • VR | • AR |
| • 360° | • Engineer (dt. Ingenieur) |
| • Architecture (dt. Architektur) | • Building (dt. Gebäude) |
| • Construction Site (dt. Baustelle) | • Facility Management (dt. Gebäudemanagement) |
| • BIM | • Training |
| • Education (dt. Ausbildung) | • Measurement (dt. Vermessung) |

Die Suchbegriffe sind jeweils in Englisch und Deutsch genutzt worden. Daneben sind Herstellerseiten und wissenschaftliche Veröffentlichungen als Referenz verwendet worden, die im Rahmen der Arbeit, Fachtagungen, Demonstrationen, Messen und Gesprächen zusammengetragen wurden. Die Veröffentlichungen, welche im Literaturverzeichnis im Abschnitt der Anwendungen nachzulesen sind, wurden anschließend durchgelesen und anhand der dort beschriebenen Angaben, Demonstrationsvideos oder Produktbeschreibungen, die Anwendung mit dem Pan-Faktor bewertet. Zur Bewertung dienten die Bewertungsdefinitionen des Konzepts. Die Ergebnisse wurden in Tabelle A-11 und in Abbildung 5-8 festgehalten. Dabei wurde festgestellt, dass oftmals die Beschreibung der genutzten Hardwaresysteme, Display oder der Anwendung lückenhaft bzw. nicht nachvollziehbar ist. Der Pan-Faktor kann hier Abhilfe schaffen und eine einheitliche Aussage bzw. Grundlage im Bereich der Forschung und Entwicklung treffen bzw. sein.

¹¹ <https://scholar.google.de/schhp?hl=de> Aufgerufen am 13.01.2020.

¹² <https://www.apple.com/de/ios/app-store/> Aufgerufen am 13.01.2020.

¹³ <https://play.google.com/store/apps?hl=de> Aufgerufen am 13.01.2020.



Bereich		Ausbildung	Planung	Ausführung	Betrieb
	Anzahl	33	32	17	20
Pan-Faktor [PP] *	min.	14	17	8	22
	max.	57	56	48	54
	Ø	39,80	35,80	33,90	39,10
Immersion [PP] **	min.	8	8	8	5
	max.	31	27	19	27
	Ø	19,00	15,60	13,80	15,00
Präsenz [PP] **	min.	6	7	0	0
	max.	20	20	20	20
	Ø	14,60	15,80	16,30	17,80
Wechselwirkung [PP] **	min.	0	0	0	2
	max.	13	15	9	13
	Ø	6,10	4,40	3,80	6,30

* Pan-Punkte beziehen sich auf die Gesamtbewertung der Anwendungen

** Pan-Punkte beziehen sich auf Einzelbewertungen der Anwendungen

Abbildung 5-8: Kategorischer Vergleich von Ingenieur Anwendungen anhand des Pan-Faktors

Neben den Ingenieur Anwendungen in der Forschung, die meist Demonstratoren sind und nur einzelne Funktionalitäten umsetzen und validieren, wurden Produkte mit dem Schwerpunkt Ingenieurwissenschaften und VR-, Erweiterte Virtualität-, AR- und Mixed-Reality gesucht. 46 kommerzielle Produkte oder beschriebene Dienstleistungen für Ingenieure und Ingenieurinnen in der Digitalen Realität konnten gefunden werden. Dies entspricht einem Anteil von 45,10 % im Vergleich zu den nicht kommerziellen Produkten der analysierten Ingenieur Anwendungen in Tabelle A-10. Aus der Beschreibung des Produkts oder Videos des Herstellers wurden die Angaben zur Berechnung des Pan-Faktors übernommen. Wie in

der Forschung ist bei kommerziellen Produkten innerhalb der Analyse der Mangel einer einheitlichen Angabe für einen direkten Vergleich zwischen den Produkten aufgefallen. Auch werden Schlagwörter missbräuchlich verwendet oder fehlen detaillierte Angaben vollständig. Deshalb wurde die Qualität der Dokumentation in die Tabelle A-10 mit aufgenommen. Dabei sind 28 Anwendungen mit mangelhafter, 38 mit ausreichender, aber auch 27 mit guter und 9 mit sehr guter Dokumentation vorhanden.

Dennoch konnten die gefundenen Anwendungen mit dem Pan-Faktor bewertet und für den Vergleich im Pan-Meter und der Handlungsempfehlung genutzt werden. Hierfür wurden alle Anwendungen in die Kategorien Ausbildung (hierzu zählt auch Training), Planung, Ausführung und Betrieb (hierzu zählt auch Wartung) im Bau- und Umweltwesen eingeteilt. Die gesammelten Ergebnisse sind in Abbildung 5-8 dargestellt und im Folgenden näher erläutert.

5.2.2 Ausbildung im Bau- und Umweltwesen

Die Analyse aller Ingenieur Anwendungen im Bereich der Ausbildung in einer Anzahl von 33 ergab einen durchschnittlichen Pan-Faktor von 39,80 PP. Das Minimum liegt bei 14 PP und das Maximum bei 57 PP (siehe Abbildung 5-8). Mit 43 PP ist damit die Differenz zwischen Minimum und Maximum im Bereich der Ausbildung am höchsten. Das lässt auf eine vielseitige Form der Umsetzung bezüglich des eingesetzten Mediums und der Qualität schließen. In der Analyse kam hervor, dass die Umsetzung von Immersion und Präsenz im Vergleich zu den Wechselwirkungen größer ist. Jede Anwendung beinhaltet demnach Immersion, wodurch z. B. in virtuellen Führungen oder Lehrvideos keine Interaktion und Kommunikation stattfindet. Mit steigendem Einsatz der Wechselwirkung steigt auch der Pan-Faktor. Insgesamt sind fünf 3D-, sieben AR-, fünf Erweiterte Virtualität-, eine 360°- und 15 VR-Anwendungen betrachtet worden. Da aktuell die Immersion technologisch in VR am größten und noch dazu Anwendungen orts- und zeitunabhängig sind, findet sich dieses Medium im Bereich der Ausbildung am meisten wieder. Das spiegelt sich auch bei den verwendeten Displayarten wider. Hier sind Head-Mounted-Displays vor Hand-Held-Displays am meisten vertreten. Für die statischen und einfachen Anwendungen werden meist in Form von Computer-Monitoren Fishtank-Displays verwendet.

5.2.3 Planung im Bau- und Umweltwesen

Im Bereich der Planung wurden 32 Anwendungen untersucht und ein durchschnittlicher Pan-Faktor von 35,80 PP, ein Maximum von 57 PP und ein Minimum von 14 PP ermittelt (siehe Abbildung 5-8). Ähnlich wie im Bereich der Ausbildung spielt die Immersion und Präsenz eine übergeordnete Rolle im Vergleich zu den Wechselwirkungen. Dies zeigt auch der Einsatz von VR als wesentliches Medium mit 19 Applikationen. VR wird aktuell größtenteils zur Immersion und Präsenz genutzt und die Wechselwirkung auf wesentliche reduziert, obwohl die Hardware bereits mehr ermöglichen würde (siehe Tabelle A-4). Dagegen stehen mit elf Anwendungen AR und jeweils einer 360° und 3D-Anwendungen gegenüber. Dies spiegelt sich ebenfalls in der Nutzung von Head-Mounted-Display seltener auch CAVEs als Displayarten wider. Wie in der Ausbildung sind im Bereich der Planung die Anwendungen meist auf die künstliche Realität beschränkt und somit unabhängig von natürlich realen Einflüssen.

5.2.4 Ausführung im Bau- und Umweltwesen

Für die Ausführung stehen mit 17 Applikationen die geringste Anzahl an Anwendungen innerhalb der Digitalen Realität zur Verfügung. Der durchschnittliche Pan-Faktor liegt bei 33,90 PP und ist damit wie auch das Minimum von 8 PP und Maximum 48 PP der kleinste Wert im Vergleich zu den anderen Kategorien (siehe Abbildung 5-8). Dies lässt darauf schließen, dass die Anzahl an Produkten und Demonstratoren in der Forschung trotz neuer Technologien noch nicht weit fortgeschritten sind bzw. umgesetzt werden. Bei der Betrachtung der einzelnen Faktoren wird ebenfalls deutlich, dass die Immersion zwar immer vertreten ist, nicht aber die Präsenz und Wechselwirkung. Dies verursacht die geringeren Werte. Dabei ist der Ansatz der Ausführung meist ein virtueller und teilweise automatisierter Soll-Ist-Vergleich auf der Baustelle oder die automatische Erkennung von Risiken und Sicherheitsmängeln, wofür die ortsgebundene natürliche Realität und somit die Präsenz eine wesentliche Rolle spielt. Mit 13 Anwendungen mit dem Medium AR wird dieser Realitätsbezug auch deutlich. Dennoch mangelt es oft durch schlechte Qualität oder den Einsatz von sachlichen 3D-Anwendungen an der Ausprägung der Einflussfaktoren. Die meisten Applikationen werden direkt auf der Baustelle über Hand-Held-Displays durchgeführt, doch sinkt der Anteil der kommerziellen Anwendungen deutlich auf 29,4 %. Damit findet der reale Einsatz von digitalen Ingenieurmethoden im Bereich der Ausführung wenig und meist nur forschungsgetrieben statt.

5.2.5 Betrieb im Bau- und Umweltwesen

Der letzte Bereich umfasst 20 Anwendungen mit einem durchschnittlichen Pan-Faktor von 39,10 PP. Das Minimum im Bereich des Betriebs liegt bei 22 PP und das Maximum bei 54 PP. Durch die Zahlen, die auch in Abbildung 5-8 visualisiert sind, wird deutlich, dass dieser Bereich statt der Präsenz einen Augenmerk auf die Wechselwirkung legt. So sind Immersion und Wechselwirkung durch Interaktion oder/und Kommunikation immer vertreten, wobei die Präsenz eine untergeordnete Rolle spielt. Dies ist insofern verwunderlich, da in diesem Bereich mit 75 % alle Anwendungen AR nutzen und somit eine reale Präsenz aufzeigen. Es werden allerdings oftmals statische AR-Anwendungen implementiert, um eine Fernüberwachung mit mangelnder Präsenz zu ermöglichen. Anders ist dies bei Applikationen im Betrieb, um wichtige Simulationsdaten oder Handlungsanweisungen z. B. in Bezug auf eine Heizungsanlage anzuzeigen und den Nutzenden zu informieren. Im Forschungskontext werden oftmals Head-Mounted-Displays in Form von AR-Brillen verwendet und in der Praxis meist Hand-Held-Displays wie beispielsweise Smartphones oder Tablets.

5.2.6 Mediennutzung der Digitalen Realität im Ingenieurkontext

Neben der Betrachtung der einzelnen Kategorien, kann eine Analyse der verschiedenen eingesetzten Medienformen durchgeführt werden. In Kapitel 3.1 werden alle Medien in Form des erweiterten Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum dargestellt und definiert (siehe Abbildung 3-2). Mit den analysierten 102 Anwendungen kann der Pan-Faktor des jeweiligen Mediums ermittelt und mit der Hardwareanalyse (siehe Tabelle A-1 ff.) die möglichen Potentiale angezeigt werden. Insgesamt wurden 46 AR-, 41 VR-, 7 3D, 5 Erweiterte Virtualität- und 2 360°-Anwendungen aufgenommen. Es gibt im Bereich der 3D-und

360°-Applikationen viel mehr Anwendungen, die im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet wurden. Die vorhandenen Werte für Durchschnitt, Minimum und Maximum können graphisch dargestellt werden (siehe Abbildung 5-9). Aufgrund der mangelnden Aussagekraft der analysierten Anwendungen für die Medien 2D, 3D und 360°-Fotos, sind diese Werte geschätzt und zur Kenntlichmachung anders eingefärbt und mit einem Hinweis ($\hat{=}$ *) versehen.

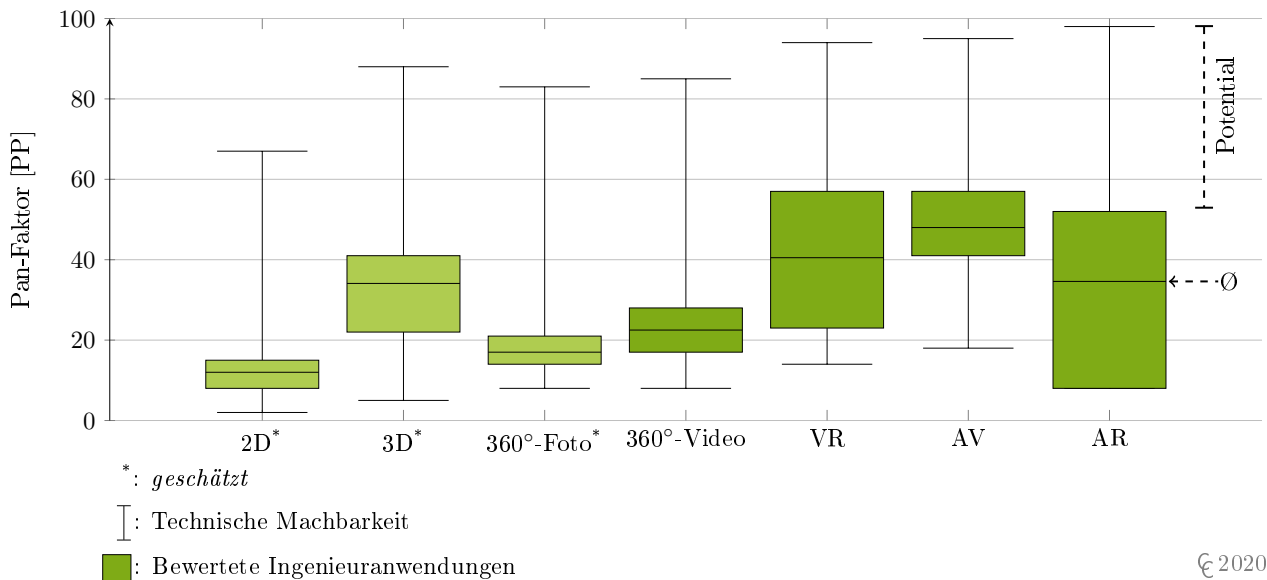


Abbildung 5-9: Pan-Faktor & Potentiale für Ingenieur Anwendungen in der Digitalen Realität (Eigene Darstellung in Anlehnung an Tabelle A-11, Tabelle A-1, Tabelle A-2, Tabelle A-4, Tabelle A-6, Tabelle A-7 & Tabelle A-8)

Die Medien sind dann auf ihre möglichen Pan-Faktoren und den Einsatzbereichen innerhalb der Ingenieur Anwendung aufgetragen worden. Die grünen Bereiche spiegeln die Ingenieur Anwendungen des jeweiligen Mediums wider, wobei der Durchschnitt als Linie innerhalb des Bereiches dargestellt ist. Mit Hilfe dieser Darstellung wird die Streuung z. B. bei VR und AR bewusst. Hier sind Maximum und Minimum sehr weit auseinander und das Feld der Werte des Pan-Faktors sehr groß. Innerhalb von AR ist der Durchschnitt dennoch im oberen Bereich der Streuung (34,60 PP), dagegen in VR gemittelt bei 48 PP. Durch die fortgeschrittenere Technik von VR und der längere Einsatz (siehe Abbildung 3-1) sind aktuell die Pan-Faktoren höher als für AR. Die Streuung in AR lässt sich nicht nur über die Einsatzdauer und technologische Umsetzung, sondern auch an den grundsätzlich verschiedenen Anwendungsfeldern erklären. Ist AR ursprünglich als Erweiterung der natürlichen Realität gedacht, welche dynamisch genutzt und ortsbezogen durch den Mensch durchgeführt wird, so findet sich oft statische AR-Anwendungen in den Ingenieurmethoden wieder. So werden Fotos mit erweiternden virtuellen Inhalten z. B. Markierungen als Soll-Ist-Vergleich verwendet. Die Dynamik und Stärke von AR wird damit aufgehoben und aktuell nicht vollumfänglich genutzt. AR wird nur zur Visualisierung und nicht mit anderen Wahrnehmungsarten verwendet. Die Technologie AR wird somit noch nicht vollumfänglich eingesetzt und hat damit das mögliche Potential noch nicht erreicht.

Neben den Bereichen der Ingenieur Anwendungen und ihrer ermittelten Pan-Faktoren, sind die technisch

möglichen Pan-Faktoren des jeweiligen Mediums als T-Linie dargestellt worden. Hierfür wurde eine Schätzung durchgeführt (siehe Tabelle A-12), die auf den technischen Möglichkeiten verschiedener Displayarten und dem Vergleich von künstlicher und natürlicher Realität basieren (siehe Kapitel 2.1, Kapitel 2.2 & Kapitel 4.1, sowie Tabelle A-1, Tabelle A-2, Tabelle A-4, Tabelle A-6, Tabelle A-7 & Tabelle A-8). Die aktuelle technische Machbarkeit ist damit aufgetragen und die Differenz der Maxima des jeweiligen Bereichs und die Machbarkeit als Potential zu verstehen. Selbstverständlich kann im weiteren Verlauf der technologischen Entwicklungen diese Bereiche verändert werden. Es wird unabhängig davon allerdings klar ersichtlich, dass in allen Medienformen die Ingenieurwissenschaften ein großes Potential in Bezug auf den Pan-Faktor besitzen. Selbstverständlich ist es nicht für jeden Anwendungsfall erstrebenswert einen maximalen Pan-Faktor zu erzielen, dennoch sollte vor allem VR-, Erweiterte Virtualität- und AR-Applikationen, basierend auf den Erkenntnissen in Kapitel 3.2, deutlich verbessert werden. Dies kann beispielsweise der Einsatz aller Sinne sein oder die Steigerung der umgesetzten Qualität.

5.2.7 Zusammenfassung der Bewertung von Ingenieur Anwendungen

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass es bereits in den großen Bereichen der digitalen Ingenieurmethoden zahlreiche Anwendungen der Digitalen Realität gibt. Diese können mit dem Pan-Faktor bewertet werden und erhalten durchschnittlich einen Wert von 38,50 PP.

Innerhalb der 102 Anwendungen wurde keine Applikation gesichtet, welche die olfaktorische oder gustatorische Wahrnehmung nutzt bzw. künstlich reizt. Obwohl es Produkte für die Verbreitung von Geruchsstoffen (siehe Tabelle A-6) und Demonstratoren für den künstlichen Geschmackssinn (siehe Tabelle A-7) gibt, werden diese in den Ingenieurwissenschaften nicht genutzt. Dies liegt sicherlich daran, dass die Anwendungsfelder im Normalfall kaum ersichtlich sind und auch der mangelnden Anzahl an Produkten bzw. Umsetzungsaufwand. Dennoch ist es, wie in den Kapitel 2.1.5 & 2.1.6 beschrieben, vorteilhaft diese Sinne zu nutzen und das erhöhte Erinnerungsvermögen, Motivation und gesteigerte Präsenzgefühl, sowie Synergieeffekte mit anderen Sinnen zu nutzen.

Insgesamt zeigt sich, dass abhängig der Kategorie andere Medien Schwerpunktmäßig genutzt werden, aber sich Kategorie übergreifend ein gleichmäßiger und enger Wertebereich der Pan-Faktoren einstellt. Diese Analyse wird im Pan-Meter als auch in der folgenden Softwareapplikation HEL.P der Handlungsempfehlung mittels Pan-Faktor genutzt (siehe Abbildung 4-4). Die Ergebnisse dienen als Grundlage zum Vergleich weiterer Anwendungen mit Hilfe des Pan-Faktors und helfen bei der Einordnung im Bezug der Potentiale (siehe Abbildung 5-9).

5.3 Entwicklung einer Handlungsempfehlung

Aufbauend auf dem Pan-Faktor, welcher mittels dem Pan-Meter für Ingenieur Anwendungen der Digitalen Realität ermittelt werden kann und der vorausgegangenen Analyse von 102 Anwendungen, ist, wie in Abbildung 4-4 verdeutlicht ist, eine Handlungsempfehlung in Kapitel 4.3 konzeptioniert worden. 68 Fragen innerhalb eines dynamischen Fragekataloges sollen helfen eine Aussage über das geeignete Medium, Displayarten, Qualitäten und möglichen Pan-Faktor zu generieren.

Im Folgenden wird die Umsetzung dieses Konzepts in einer Webseite erläutert. Die Anwendung trägt den Namen HEL.P, was sich zusammensetzt aus Handlungempfehlung mittels Pan-Faktor. Es wird der

Aufbau der Webseite beschrieben und die Implementierung des dynamischen Fragebogens erklärt und anschließend der Ablauf zum Erhalt einer Empfehlung über HEL.P aufgezeigt. Daneben wird der Umfang der Empfehlung und die Zusammensetzung wie auch der Ursprung der Erkenntnis geklärt und für drei verschiedene Anwendungsfälle passend gestaltet. Diese Anwendungsfälle werden beschrieben und die Voraussetzungen, sowie das Ergebnis definiert.

5.3.1 Der Aufbau der Webseite

Die Webseite wurde ähnlich wie das Pan-Meter mit Angular CLI¹⁴ in der Version 8.3.21, Angular¹⁵ in Version 8.2.14, sowie Node.js¹⁶ in Version 10.16.0 umgesetzt. Dazu kommen weitere Hilfsbibliotheken zur Implementierung einiger Zusatzfunktionen wie der Export von PDF-Dateien oder die Ausgabe als visuelle Graphik. Diese Bibliotheken sind:

- Angular Material¹⁷ (Version 8.1.0): Basis des Webdesigns mit vorgefertigten Bausteinen und Elementen wie z. B. Buttons, Tooltips, Textfelder u.ä.
- Google Charts¹⁸ (Version 6.01.2020):
Darstellung von interaktiven Diagrammen und Graphiken
- Papa Parse¹⁹ (Version 5.1.1): Import von CSV-Dateien und Konvertierung zu JSON-Objekten
- PDFMake²⁰ (Version 0.1.63): Erstellung und Export von PDF-Dateien
- Hammerjs²¹ (Version 2.0.8): Ermöglichung von Touch-Interaktionen mit der Webseite
→ Bedienbarkeit mittels Smartphones und Tablets

Mit Hilfe von Typescript, JavaScript, HTML und den beschriebenen Hilfspaketen wurde die Anwendung HEL.P, wie sie im Komponentendiagramm in Abbildung 5-10 dargestellt ist, implementiert. Der Aufbau ist ähnlich dem des Pan-Meters in Kapitel 5.1 gehalten. Es soll nun kurz auf die einzelnen Komponenten eingegangen werden.

Angefangen wird bei der **Beschreibung**, welche eine reine HTML-Seite mit den Informationen zur Handlungsempfehlungen und dem Aufbau ist. Der Inhalt stammt aus Kapitel 4.3 und soll dem Einstieg und Verständnis für HEL.P dienen. Daneben gibt es erneut den **Datenhändler**, der wie bereits beim Pan-Meter den Import der CSV-Dateien als JavaScript Object Notation (JSON)-Objekte, sowie den Export als PDF-Datei ermöglicht. Ebenfalls vorhanden ist der **Pan-Service** aus der Entwicklung des Pan-Meters, welcher die Aufgabe hat, verschiedene Pan-Faktoren zu berechnen und zu ermitteln. Zum einen als möglicher Pan-Faktor der zu empfehlenden Anwendung, zum anderen für die verschiedenen Varianten und der zu vergleichenden Kategorie.

Sowohl der Pan-Service als auch der Datenhändler sind mit dem **Advice-Service** (dt. Empfehlungsservice) verknüpft. Dieser Service stellt das Herzstück der Anwendung HEL.P dar. In ihm werden alle wesentlichen Komponenten verknüpft und abhängig der Eingaben mittels der Modelle die Empfehlungsvarianten

¹⁴ <https://cli.angular.io/> Aufgerufen am 14.01.2020.

¹⁵ <https://angular.io/> Aufgerufen am 14.01.2020.

¹⁶ <https://nodejs.org/en/> Aufgerufen am 14.01.2020.

¹⁷ <https://material.angular.io/> Aufgerufen am 14.01.2020.

¹⁸ <https://developers.google.com/chart> Aufgerufen am 14.01.2020.

¹⁹ <https://www.papaparse.com/> Aufgerufen am 14.01.2020.

²⁰ <http://pdfmake.org/> Aufgerufen am 14.01.2020.

²¹ <https://hammerjs.github.io/> Aufgerufen am 14.01.2020.

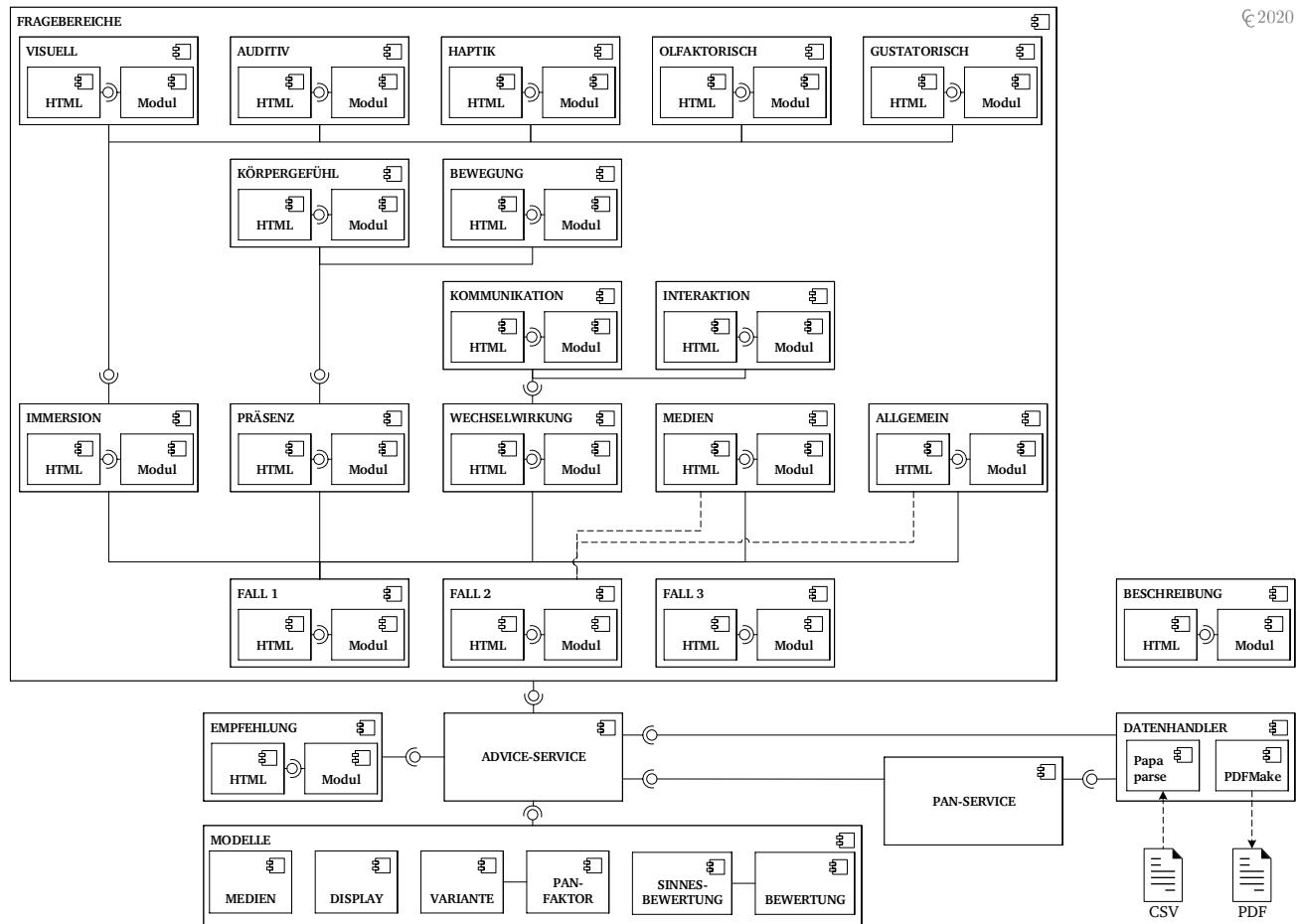


Abbildung 5-10: UML-Komponentendiagramm zur Durchführung von HEL.P.

ermittelt. Daneben beinhaltet diese Komponente alle Antworten des Anwendenden und formuliert daraus Ergebnismengen bzw. Ausschlussmengen einzelner Medien, Displayarten und Qualitäten der Sinne. Dies geschieht in Echtzeit und basiert auf der Webfunktionalität von **Observables** (dt. beobachtbar). Observables sind Objekte in JavaScript, welche selbstständig auf Änderungen überprüft werden und abhängig dieser Änderungen Kontext generieren. Dabei erzeugen diese selbstständig ein Event, welches verarbeitet wird. Es ist keine aufwendige Überwachung nötig. So kann beispielsweise in einer HTML-Seite ein Titel oder Name als Observable deklariert sein und bei einer Änderung z. B. innerhalb eines Textfeldes wird diese gleichzeitig synchronisiert und angepasst. Für die Observables sind Modelle hilfreich und zielführend.

Diese befinden sich verknüpft mit dem Advice-Service ebenfalls im Komponentendiagramm Abbildung 5-10 unten wieder. Es gibt für die Empfehlung sechs Modelle, wobei vier aufeinander aufbauen. Die Modelle spiegeln die einzelnen Bereiche der Empfehlung wider. So sind es die Ergebnisse für den Filter des Mediums, der Displayarten verschiedener Bereiche (visuelle, auditive, haptische, olfaktorische, gustatorische Wahrnehmung sowie Körpergefühl und Bewegung), die Qualitäten des Pan-Faktors sowie die Varianten abgebildet. Die Modelle beinhalten zahlreiche Wahrheitswerte (engl. boolean), welche zwei verschiedene Werte annehmen können. Bei positivem Wert ist dieser Eintrag noch möglich, bei Negativem ist ein klarer Ausschluss vorgesehen. Im Beispiel der Medien sind alle Arten des erweiterten Realitäts-Virtualitäts-Kontinuums enthalten. Die Displayarten reichen über World-Fixed-Display und

On-Body-Display zu den Natural-Real-Displays und Ear-Mounted-Display wie es in den Grundlagen erarbeitet wurde. Die Bewertung der einzelnen Sinne im Modell **Sinnesbewertung** setzt sich aus dem Bewertungsschema in Tabelle 5-1 zusammen und kann somit das Konzept direkt integrieren. Die einzelnen Varianten vereinen ein Teil der Ergebnisse aus den anderen Modellen in sich (siehe Kapitel 5.3.3) und ergänzen diese mit zusätzlichen Informationen wie dem möglichen Pan-Faktor oder einzelnen Tipps. Diese Tipps bestehen größtenteils aus den Definitionen der Qualitäten des Pan-Faktors und werden basierend auf den Ergebnissen der Empfehlung hinzugefügt.

Die Modelle werden über den Advice-Service mittels der Eingaben der anwendenden Person befüllt. Für die Eingabe stehen dem Nutzer kontextsensitive Fragen in Form von Radiobuttons zur Verfügung. Die Fragen spiegeln die 68 Fragen aus dem Konzept in Kapitel 4.3 wider. Aufgrund der Vielzahl der Fragen, den verschiedenen Fällen, welche in den nächsten Kapiteln erläutert werden, und der Anforderung einer Dynamik, sind die Fragen in einzelne bereichsabhängige Blöcke unterteilt worden. Jeder Block findet sich als eigene Komponente in Abbildung 5-10 in Form einer HTML-Seite mit verknüpftem Modul wieder. Die HTML-Seite beinhaltet alle Fragen des jeweiligen Bereiches und in Abhängigkeit verschiedener Einträge der abgebildeten Modelle Bedingungen, ob die Frage angezeigt werden soll oder nicht. Näheres dazu in Kapitel 5.3.2. Die Bereiche bzw. Blöcke sind dabei sehr fein und kleinteilig aufgebaut, um zum einen die Übersicht und Anpassbarkeit bei der Implementierung zu gewährleisten und zum anderen um die Inhalte abhängig der verschiedenen Fälle zusammensetzen zu können. In Abbildung 5-10 ist diese Verknüpfung dargestellt, die Abhängigkeiten mit Linien erklärt und die Zusammensetzung der Fälle visualisiert. Durch diese Umsetzung und Darstellung ist trotz der Komplexität und Vielfalt eine übersichtliche und anpassbare Struktur umgesetzt.

Zum Abschluss befindet sich noch eine Komponente **Empfehlung**, welche die Ergebnisse des Advice-Service optisch für den Anwendenden aufbereitet und visualisiert. Dabei wird in allen HTML-Seiten ähnlich der Umsetzung des Pan-Meters die Informationstiefe über Tooltips gewährleistet.

5.3.2 Das Umsetzungsprinzip des dynamischen Fragebogens

Durch das Angular Material⁵ stehen bereits einige vordefinierte Eingabe- & Darstellungsmöglichkeiten zur Verfügung, die über HTML bereitgestellt werden können. Dies sind beispielsweise Textfelder, Check-boxen, Comboboxen aber auch Radiobuttons. Textfelder lassen freie Texteingaben durch den Anwendenden zu, wohingegen die anderen vordefinierte Zustände zur Auswahl ermöglichen. Um bereits bei der Anwendung Eingabefehler durch den Nutzenden zu vermeiden, sind die Möglichkeiten der definierten Zustände sinnvoller. In Falle von HEL.P wurden Radiobuttons mit den Antwortmöglichkeiten „Ja“ und „Nein“ primär umgesetzt. Dies ist möglich, da die Fragen des Konzepts, wie der Tabelle A-13 zu entnehmen ist, dies unterstützen. Diese können ebenfalls direkt an einen Wahrheitswert gekoppelt sein und somit als Observable Verknüpfungen und Werte in Echtzeit verändern.

Jede Frage ist somit als Text wie dieser in Tabelle A-13 formuliert ist und als Radiobutton zur Eingabe umgesetzt worden (siehe Screenshots in Abbildung 5-11). Einige Fragen erhalten zur näheren Erläuterung einen Tooltip, der beim Mouseover über die Frage erscheint. Die Antwort des Nutzenden wird direkt über ein Observable mit einem Wahrheitswert verknüpft und die Änderung direkt abgefangen. Das dadurch ausgelöste Event wird in einer Methode behandelt, welche die Belegung der Ergebnis- und Ausschlussmenge kontrolliert bzw. weitere Werte entsprechend der Verlinkung aus Abbildung A-1

umsetzt. Die Logik dafür steckt im jeweilig verknüpften Modul und wird in diesem über den Advice-Service bzw. der darin verknüpften Module abgefragt. Kurz gesagt ändert jede Eingabe des Nutzenden oder geänderte Entscheidung die Ergebnis- und Ausschlussmengen. Die einzelnen Einträge dieser Mengen stehen gleichzeitig als Observable anderen Fragen als Anzeigebedingung zur Verfügung. Es können also die Verknüpfungen innerhalb der Fragen, wie sie im Konzept beschrieben und in den zahlreichen Abbildungen visualisiert sind, umgesetzt werden, indem die Fragen in Abhängigkeit eines bestimmten Ergebnisses oder Ausschlusskriteriums angezeigt wird oder nicht.

Mit Hilfe dieser Verknüpfung kann das Aussehen der Webseite gesteuert und dem Anwendenden nur die Fragen und Inhalte dargestellt werden, die dieser für die Beantwortung benötigt (siehe Abbildung 5-11



Abbildung 5-11: Ausgewählte Screenshots zur Dynamik des Fragebogens

(1), (2), (5) & (6)). Jede Abzweigung des Entscheidungsdiagramm in Abbildung A-1 wird damit abgebildet und die jeweiligen Fragen angepasst. In Abbildung 5-11 sind einzelne Ausschnitte von Screenshots visualisiert, welche diesen Vorgang näher erläutern. Abhängig der Beantwortung von Frage 2.1.1 wird entweder (4a) oder (4b) in Abbildung 5-11 gerendert und die unnötigen Fragen ausgeblendet. Werden die Fragen 2.1.1.1, sowie 2.1.1.1.1 und 2.1.1.1.1.1 mit einer positiven Eingabe bewertet, stellt sich die maximale Anzahl an Fragen im Bereich der Medienauswahl (siehe Abbildung 5-11 (5) & (6)) dar. Mit dieser Funktionsweise ist eine schlanke und übersichtliche Gestaltung möglich, welche die fehlerhaften Eingaben eines Nutzens auf ein Minimum reduziert. Ebenfalls ist dies die Möglichkeit die beschriebene Dynamik aus dem Konzept umzusetzen.

Daneben wird der dynamische Fragebogen über einen linearen Aufbau mit unterstützenden Fortschrittsanzeige motivierend und einfach umgesetzt. In Abbildung 5-11 (3) ist der umgesetzte Stepper dargestellt, welcher mit Hilfe der Buttons „Zurück“ und „Weiter“ linear durch alle Bereiche und Fragen führt. Die anwendende Person wird Schritt-für-Schritt durch die einzelnen Abschnitte und Bereiche geleitet. Erst bei Beantwortung wird der nächste Bereich freigeschaltet und bei späterer Änderung einer vorherigen Antwort, ist eine erneute Eingabe aller weiteren Fragen erforderlich. Dies dient ebenfalls dazu fehlerhafte Empfehlungen aufgrund einer nachträglichen Änderung auszuschließen. Gleichzeitig wird der Fortschritt aufgenommen und in Prozent sowie durch einen Balken angezeigt bzw. visualisiert (siehe Abbildung 5-11 (3), (7) & (8)). An diesen Fortschritt ist ebenfalls die Möglichkeit zur Durchführung von HEL.P gekoppelt. In Abbildung 5-11 (7) sieht man den ausgegrauten Button, welcher für eine Betätigung nicht zur Verfügung steht und somit keine Empfehlung erstellt werden kann. Erst bei ausreichender Beantwortung und einem Fortschritt von 100 % wird der Button automatisch aktiviert und kann eine Empfehlung ermittelt werden (siehe Abbildung 5-11 (8)).

Die Ergebnismengen ergeben sich aus der positiven Belegung ($\hat{=}$ true) der einzelnen Einträge innerhalb der Modelle. Die Ausschlussmenge wiederum spiegelt die negative Belegung ($\hat{=}$ false) wider. Alle Verknüpfungen, Fragen und Bedingungen der Handlungsempfehlung wurden damit umgesetzt und es können die 68 Fragen reduziert für den jeweiligen Fall und die Eingabe des Nutzens mit direkter Auswirkung auf die Empfehlung dargestellt werden.

5.3.3 Der Empfehlungsaufbau

Basierend auf den Ergebnis- und Ausschlussmengen für die verschiedenen Bereiche des Fragebogens können Empfehlungen für die Nutzung der Medienart, verschiedener Displaysysteme und Qualitäten der Umsetzung entwickelt werden. Im Rahmen der Umsetzung sind drei Anwendungsfälle festgelegt worden, welche sich in der Anzahl der beantwortenden Bereiche bzw. Fragen, sowie in der Detaillierung der resultierenden Empfehlung unterscheiden. Im Szenario 1 und 2 ist davon auszugehen, dass der Ingenieur und Ingenieurin noch keine Applikation besitzt und basierend auf einer Idee bzw. Vorstellung eine Empfehlung zur Umsetzung erhalten möchte (siehe Abbildung 5-12 links). Der Unterschied beider Fälle liegt in der Ausprägung der Fragen und damit der Detaillierung der ausgegebenen Empfehlung. Im Szenario 1 werden alle Bereiche abgefragt und detaillierte Ergebnisse ermittelt. Sie wird im Weiteren das „Detaillierte Szenario“ genannt. Im Anwendungsfall 2 wird ein kurzes Szenario zur Ermittlung des geeigneten Mediums angeboten. Sie wird im Weiteren das „Kurze Szenario“ genannt. Im Gegensatz dazu steht Szenario 3 (siehe Abbildung 5-12 rechts). Hier liegt bereits eine Applikation vor, wie in Abbil-

dung 5-12 beispielsweise eine 360°-Anwendung, und kann ein Pan-Faktor berechnet werden. Basierend auf diesem kann ein Verbesserungsvorschlag bzw. der Vergleich zu anderen Anwendungen (siehe Tabelle A-11) unterbreitet werden. Sie wird im Weiteren als „Anwendungsgestützt“ bezeichnet.

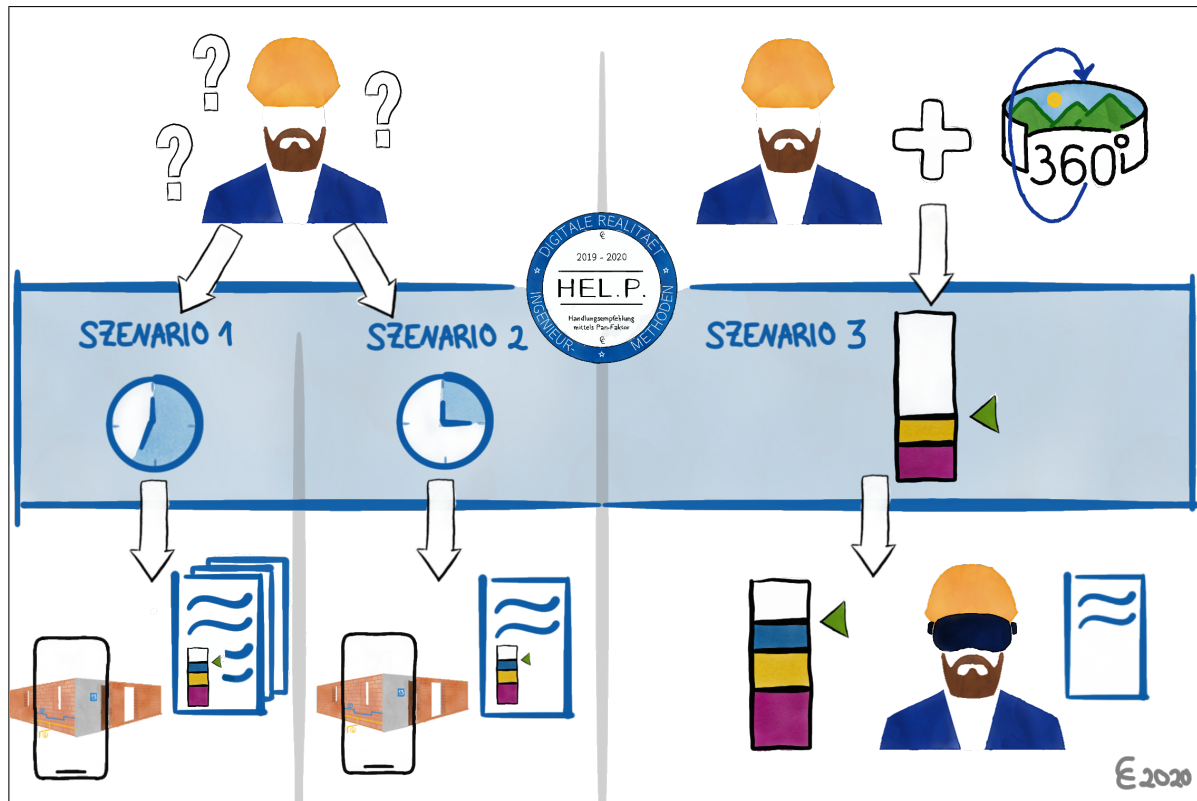


Abbildung 5-12: Übersicht über die drei Szenarien von HEL.P.

Neben den Anwendungsfällen, die in Kapitel 5.3.4 näher erläutert sind, besteht für jeden Fall die Empfehlung aus maximal drei Varianten (siehe Abbildung 5-13). Mit diesen drei Varianten innerhalb jedes Szenarios soll ein breites Spektrum an Lösungsmöglichkeiten angeboten werden. Es ist davon auszugehen, dass Anwendende durch mangelnde Präzision der Ziele, Anforderungen und Vorstellungen über die Applikation, keine genaue Eingabe tätigen. Beispielsweise gibt die anwendende Person immer das vermeintlich Beste ein, was später zu einer unrealistisch teuren Applikation führen kann. Deshalb sind drei Stufen in den Szenarien implementiert. Die erste Variante bietet die Übersicht für eine Anwendung, die in ihrer Qualität und in dem Medium unterhalb des Geforderten liegt (siehe Abbildung 5-13 links). Somit entspricht sie nicht direkt den Antworten des Nutzenden, sondern hält durch Reduktion der Qualität oder des Mediums eine Möglichkeit, welche ein größeren Abstraktionslevel besitzt, bereit. Es ist davon auszugehen, dass bei geringer Immersion und Realitätsnähe der Umsetzungsaufwand reduziert werden kann und somit die Kosten gesenkt sind. Deshalb wird diese Variante auch als „preisgünstig“ bezeichnet. Dies ist ein reiner Bezeichner und wird des Weiteren nicht mit Zahlen belegt. Um vom optimalen Ergebnis eine Empfehlung mit einer Verringerung des Aufwands zu erhalten, wurde auf das erweiterte Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum und die Analyse der Medienarten in Abbildung 5-9 zurückgegriffen. Mit diesem Wissen konnte eine Empfehlungsdefinition erstellt werden (siehe Tabelle A-14). Die Tabelle A-14 enthält abhängig des Mediums eine Empfehlung für die Variante 1 und 3, sowie die unterschiedlichen

bietet es sich an diese Variante als „zukunftsorientiert“ zu bezeichnen. Auch diese These wird im Rahmen dieser Arbeit nicht überprüft.

HEL.P. schafft demnach drei Szenarien mit bis zu drei Varianten, die den minimalen, optimalen und maximalen Pan-Faktor einer neuen oder bestehenden Anwendung anzeigen kann. Je nach Anwendungsfall werden diese Varianten unterschiedlich ermittelt und angezeigt. Eine Erläuterung folgt im kommenden Abschnitt.

5.3.4 Die Funktionsweise der Webseite

Im Folgenden werden die zuvor beschriebenen Anwendungsfälle näher betrachtet, der Nutzungsablauf erläutert und der Rückschluss der Ergebnisse für eine Empfehlung dargelegt. Beim Öffnen der Webseite liegt dem Nutzenden die in Abbildung 5-14 dargestellte Ansicht vor. Im oberen Abschnitt ist eine ausklappbare Informationsbox, welche HEL.P. in seiner Funktion und Zweck kurz erläutert. Darunter befindet sich der Abschnitt **Fragebogen**, welcher das Konzept mit allen Fragen der Fragesammlung (siehe Tabelle A-13) enthält. Die erste Frage zielt dabei auf die gewünschte Form und somit den jeweiligen Anwendungsfall ab. Über die Radiobuttons kann ausgewählt werden, ob das „Detaillierte Szenario“, das „Kurze Szenario“ oder die „Anwendungsgestützte“ Option gewählt werden soll. Je nach Auswahl passt sich der darunter liegende Bereich an.

i) Anwendungsfall 1: Neue Entwicklung - Detailliertes Szenario

Beschreibung der Ausgangslage des Anwendenden

Für den ersten Anwendungsfall liegt das Interesse für eine neue Entwicklung einer Applikation der digitalen Ingenieurmethoden vor. Die anwendende Person möchte in Erfahrung bringen, welches Medium eingesetzt werden und welcher Pan-Faktor mit was für einer Qualität im Bereich der Immersion, Präsenz und der Wechselwirkung erreicht werden kann. Daneben sollen Informationen über geeignete Displayarten im Kontext der Wahrnehmung und der Bewegung gefunden und aufbereitet werden.

Der Ingenieur oder die Ingenieurin hat eine Vorstellung, Idee und gezielte Anforderungen an die zu entwickelte Applikation. Diese können durch den Nutzenden formuliert und damit die Fragen gezielt beantwortet werden. Die anwendende Person wählt die Option „Detailliertes Szenario“ auf der Webseite von HEL.P. aus. Es erscheint ein Stepper, welcher über die Bereiche des Allgemeinen, Mediums, der Immersion, der Präsenz und der Wechselwirkung führen (siehe Abbildung 5-14).

Durchführung von HEL.P.

Um HEL.P. durchführen zu können und damit eine Empfehlung zu erhalten, muss die nutzende Person innerhalb aller Bereiche abhängig des UML-Flussdiagramms (siehe Abbildung A-1) und der Fragesammlung (siehe Tabelle A-13) alle Fragen beantworten. Dabei wird, wie im UML-Sequenzdiagramm in Abbildung 5-15 dargestellt ist, beim Ausfüllen der Fragen die Werte an den Advice-Service übergeben, welcher damit die Ergebnismengen füllt und die Werte in den jeweiligen Modellen hinterlegt.

Anschließend überprüft die Komponente des jeweiligen Fragebereichs die Verknüpfungen und Abhängigkeiten zu anderen Fragen und blendet unnötige Fragen aus bzw. folgende Fragen ein. Dieser Prozess wird für alle Fragen wiederholt bis der Fortschritt bei 100 % liegt. Sind alle Fragen beantwortet, lässt sich

Pan-Faktor
HEL.P

Was ist HEL.P.?

HEL.P. ist die Kurzform für den Begriff "Handlungsempfehlung mittels Pan-Faktor".

Fragebogen

Wählen Sie aus welche Form des Fragebogens Sie beantworten wollen:

☐ Anwendungsgestützt
☐ Kurzes Szenario
☒ Detailliertes Szenario

1
Allgemein

2
Medienauswahl

3
Art und Weise der Immersion

4
Art und Weise der Präsenz

5
Art und Weise der Wechselwirkung

Name der Anwendung

Neue Anwendung

Anwendungsbereich wählen

Ausbildung

Soll die Anwendung länger als 60 Minuten am Stück genutzt werden?

☐ Ja
☐ Nein

Weiter ▶

Fortschritt: 0 %

HEL.P. durchführen

HEL.P. - Handlungsempfehlung mittels Pan-Faktor

Beantworten Sie den Fragebogen, um eine Handlungsempfehlung für Ihre Anwendung zu erhalten.

Entwickelt im Rahmen der Dissertation von Christian Eller M.Sc. 2019/2020

[Impressum](#)
[Datenschutzerklärung](#)

Abbildung 5-14: Screenshot der Startseite von HEL.P.

der Button „HEL.P. durchführen“ betätigen und somit der eigentliche Prozess der Handlungsempfehlung starten. Hierfür lädt der Advice-Service über den Datenhändler die benötigten CSV-Dateien ein. Dies sind zum einen die Vergleichsdaten aller 102 Ingenieur Anwendungen aus Tabelle A-11 und zum anderen die Informationen zur Medienempfehlung aus Tabelle A-14. Diese liegen anschließend als JSON-Objekte vor und können in Echtzeit durchsucht und gefiltert werden.

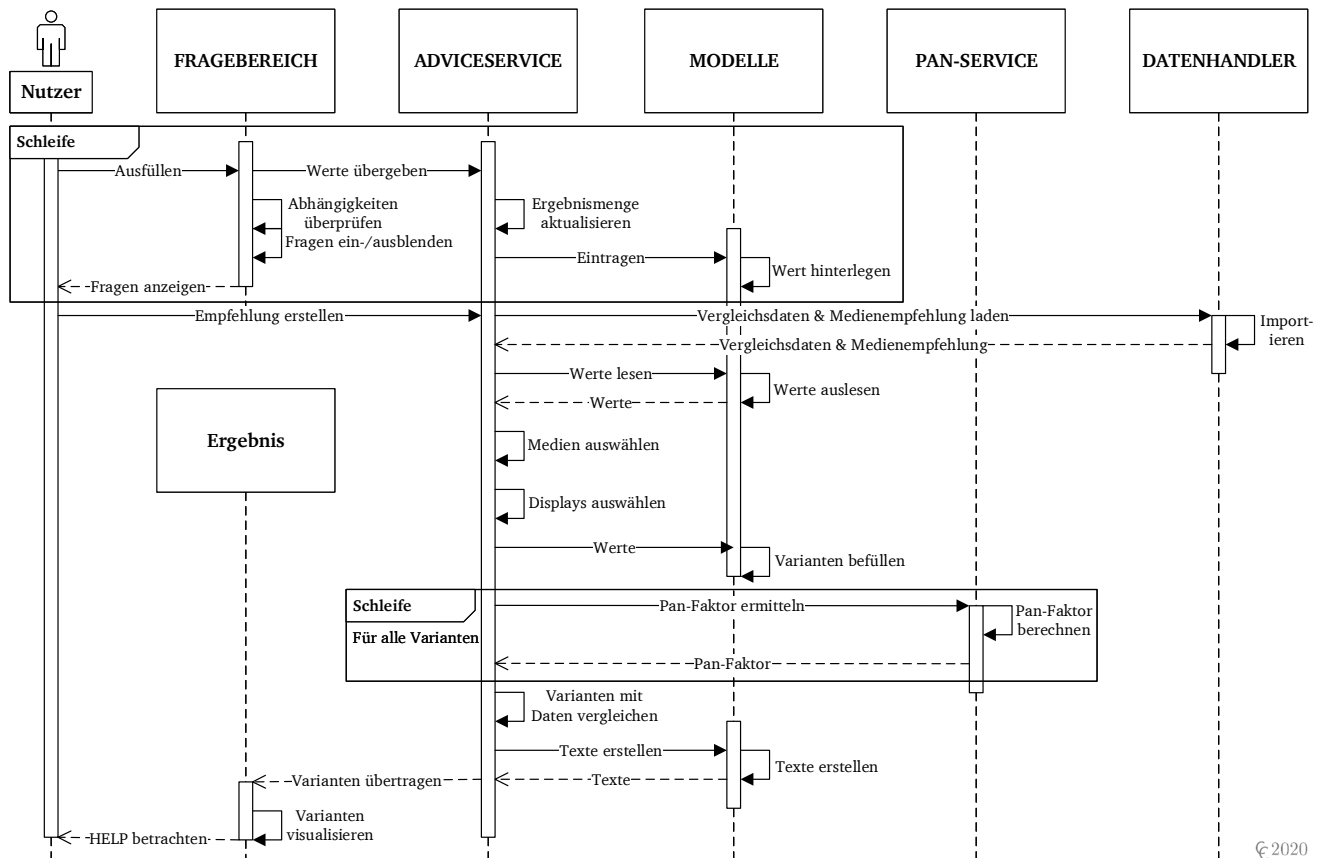


Abbildung 5-15: UML-Sequenzdiagramm zur Durchführung von HEL.P.

Anhand der Ergebnismengen und den Werten der Modelle werden die geeigneten Medien, Displays und Umsetzungsqualitäten ausgewählt. Hierfür wird in der jeweiligen Menge über alle Wahrheitswerte iteriert und die Elemente mit dem Wert `true` gesammelt. Durch die vorherigen Abhängigkeiten und Verknüpfungen trifft dies nur auf die Geeigneten zu. Mit dieser Auswahl wird die Instanz der zweiten Variante befüllt. Variante 1 und 3 werden abhängig der Medienauswahl mit der Filterung der jeweiligen Variante aus Tabelle A-14 instanziiert, wie in Abbildung 5-13 veranschaulicht ist. Eine Aussage zu den Displayarten oder der Qualität kann nicht getroffen werden, da nicht eindeutig gesagt werden kann, welche Abstraktion bzw. welcher Mehraufwand geeignet ist, um das Optimum zu unter- bzw. übertreffen.

Anschließend werden für die zweite Variante zwei Modelle des Pan-Faktors angelegt und jeweils der Pan-Faktor berechnet. Bei dem ersten Modell wird davon ausgegangen, dass die empfohlenen Qualitäten in einer Quantität von „Wenig“ umgesetzt werden. Dies entspricht dem Minimum der möglichen Umsetzung. Beim zweiten Modell wird davon ausgegangen, dass die Qualitäten in einer Quantität von „Vollständig“ umgesetzt werden. Dies ist der maximal zu erreichende Pan-Faktor der zu empfehlenden Anwendung. Es gibt somit für die Variante einen möglichen Bereich des zu erreichenden Pan-Faktors. Die Variante 1 und 3 enthalten ebenfalls zwei Modelle als Minimum und Maximum des Pan-Faktors. Allerdings werden diese aufgrund der fehlenden Qualitätsbeschreibung nicht berechnet, sondern ebenfalls über die Tabelle A-14 ermittelt. Hierfür stehen die Spalten Minimum, Maximum und Durchschnitt zur Verfügung.

Sind alle Varianten instanziiert und die Bereiche des zu erreichenden Pan-Faktors ermittelt, werden diese mit der Auswahl der gleichen Kategorie aus den 102 Anwendungen in Tabelle A-11 verglichen. Der Vergleich, wird abhängig der Unterschiede automatisch als Text formuliert. Es wird dabei unterschieden, ob die neue Anwendung unter oder oberhalb des Durchschnitts liegen wird und wie groß der Abstand zum Maximum ist. Diese Texte und Varianten werden an die Komponente **Ergebnis** übertragen und dort visualisiert. Damit ist HEL.P im Anwendungsfall 1 abgeschlossen.

Ergebnis von HEL.P.

Als Ergebnis erhält die anwendende Person mindestens zwei Varianten mit dem möglichen Pan-Faktor, dem Vergleich zu anderen Ingenieur Anwendungen und dem geeigneten Medium zurück. Wenn das geeignete Medium nicht einer 2D- oder AR-Anwendung entspricht, werden alle drei Varianten angezeigt. Ist eine 2D- oder AR-Anwendung als Ergebnis herausgearbeitet worden, ist eine Reduktion zu einer preisgünstigen oder eine Aufwertung zu einer zukunftsorientierten Variante, wie in Tabelle A-14 dargestellt, nicht möglich. In dem Fall wird die jeweilige Variante nicht angezeigt.

Für alle Varianten wird auf der Webseite in einer schlichten und hervorgehobenen Darstellungsform das wesentliche Merkmal des möglichen Pan-Faktors visualisiert (siehe Abbildung 5-16). Es ist somit eine schnelle Übersicht zum einfachen Vergleich der Varianten untereinander möglich.



Abbildung 5-16: Screenshot des Ergebnisses von HEL.P.

Darunter befindet sich in einem ausklappbaren Register die Detailinformationen für jede angezeigte Variante. Durch die Auswahl der Variante öffnet sich das Register und präsentiert in Textform abschnittsweise das Ergebnis von HEL.P. (siehe Abbildung 5-17). Hier sind detailliert alle Informationen aufbereitet. Bei allen Varianten wird der mögliche Bereich des zu erreichenden Pan-Faktors aufgezeigt. Daneben wird direkt ein Vergleich mit den bestehenden Ingenieur Anwendungen aus Tabelle A-11 gezogen und die Differenz zum Durchschnitt und Maximum dargelegt. Anschließend findet sich in einem weiteren Abschnitt das Ergebnis zur Eignung des Mediums wieder. Das Medium wird genannt und die Beschreibung, ähnlich der aus Kapitel 3.1, als weitere Erläuterung hinzugefügt. Die nutzende Person hat damit die Möglichkeit

auch ohne Wissen etwas zur Art und Gestaltung zu erfahren.

Für die Variante 2 werden zusätzlich weitere Empfehlungen zur Verfügung gestellt. Dies sind in einem folgenden Abschnitt die Aussage zu geeigneten Displayarten für jede Wahrnehmungsart als auch der Präsenz mit Körpergefühl und Bewegung (siehe Abbildung 5-17). Ist kein Display der jeweiligen Art zu empfehlen, wird dieses nicht visualisiert. Alle anderen werden in einer interaktiven Menüstruktur aufbereitet und dargestellt. Die anwendende Person erhält primär die Anzahl und Art des Displays und kann durch einen Klick auf die Anzeige eine Auflistung aller geeigneten Displayarten erhalten. Durch das Zeigen auf ein spezielles Display wird dazu eine Erklärung bzw. Erläuterung als Tooltip angezeigt (siehe Abbildung 5-17 rote Markierungen). Mit dieser Möglichkeit kann wiederum in schlankem und übersichtlichem Aufbau und dennoch eine große Informationstiefe gewährleistet werden.

Mit dem gleichen Aufbau wird folgend ein neuer Abschnitt mit den zu empfehlenden Umsetzungsqualitäten der Einflussfaktoren des Pan-Faktors kompakt und informativ visualisiert. Hier wird innerhalb des Menüs die einzelnen Aspekte des jeweiligen Faktors mit der Qualitätsbeschreibung aus Tabelle 5-1 angezeigt und durch das Zeigen auf einen speziellen Eintrag innerhalb eines Tooltips die jeweilige Definition des Pan-Faktors, wie sie in den Tabellen im Kapitel 4.2 festgelegt sind, visualisiert.

Die gleichen Informationen werden nochmals als ausformulierter Text im letzten Bereich ausgegeben, so dass jeder Nutzende wählen kann, wie dieser die Informationen verarbeiten und aufnehmen möchte. Dabei werden die Datenmengen für die Displays und Definitionen über den Datenhändler aus einer CSV-Datei gelesen und importiert. Dies ermöglicht die schnelle und einfache Änderung der Inhalte in einer zukunftsorientierten Nutzung.

Nachdem HEL.P durchgeführt wurde, gibt es die Möglichkeit das Ergebnis als PDF-Datei herunterzuladen. Orientiert an der Aufbereitung, wie vorher beschrieben, wird dabei automatisch eine Empfehlung formuliert und zum Download zur Verfügung gestellt. Wie im Anhang A.4.3 zu sehen ist, wird auch hier zu Beginn die Übersicht auf die möglichen Pan-Faktoren gezeigt und anschließend jede Variante im Detail verschriftlicht. Die Menüführung ähnlich der Webseite ist natürlich nicht möglich, weshalb auf eine Aufzählung zurückgegriffen wurde. Die Inhalte entsprechen denen der Webseite.

ii) Anwendungsfall 2: Neue Entwicklung - Kurzes Szenario

Beschreibung der Ausgangslage des Anwendenden

Im zweiten Anwendungsfall hat der Ingenieur und die Ingenieurin ähnlich dem Anwendungsfall 1 noch keine Applikation entwickelt und möchte eine Umsetzungsempfehlung erhalten. Hierbei reicht dem Anwendenden die Information zum möglichen Pan-Faktor sowie des geeigneten Mediums. Die Anzahl der Fragen soll reduziert und die Anwendungsdauer damit verringert werden.

Diese Option ermöglicht einen schnellen und kurzen Überblick zur Realisierung einer konkreten Idee der digitalen Ingenieurmethoden. Die anwendende Person wählt hierfür auf der Webseite das „Kurze Szenario“.

Durchführung von HEL.P.

Bei der Auswahl der kurzen Variante werden, wie es im Komponentendiagramm in Abbildung 5-10 visualisiert ist, nur die Fragen aus dem allgemeinen Bereich und zur Filterung des Mediums angezeigt (siehe Tabelle A-13). Die Fragen zur Immersion, Präsenz und Wechselwirkung entfallen, um eine Verkürzung

des Fragebogens und der Aufwandsdauer zu erreichen.

Wie bereits in Abbildung 5-15 dargestellt ist, wird bei der Beantwortung der Fragen die Ergebnismengen gefüllt und Werte in den jeweiligen Modellen abgelegt. Darauf basierend werden Fragen angezeigt, entfernt oder ausgetauscht. Es sind wesentlich weniger Fragen nötig, um den Fortschritt von 100 % zu erreichen. Anschließend kann die nutzende Person HEL.P. durchführen und das Ergebnis im nächsten Abschnitt betrachten.

Ergebnis von HEL.P.

Ähnlich dem Ergebnis aus Anwendungsfall 1 wird der mögliche Pan-Faktor für mindestens zwei Varianten angezeigt. Ebenfalls können detaillierte Informationen den Registern entnommen werden (siehe Abbildung 5-17). Anders als im Anwendungsfall 1 wird der mögliche Pan-Faktor bzw. Bereich für jede Variante aus der Medienempfehlung (siehe Tabelle A-14) entnommen und kann aufgrund der mangelnden Datenmenge zu einzelnen Qualitäten nicht berechnet werden. Auch wird die Variante 2 gleich wie Variante 1 und 3 aufgebaut und finden sich keine genauen Beschreibungen zu Displayarten und Umsetzungsqualitäten wieder. Es handelt sich um eine gekürzte Version. Diese Details können bei einem gekürzten Fragebogen nicht erhoben und deshalb nicht angezeigt werden. Allerdings werden der Abschnitt zum möglichen Pan-Faktor mit dem Vergleich zu anderen Anwendungen sowie das geeignete Medium angezeigt (siehe Abbildung 5-17 oberer Bereich). Somit besteht die Möglichkeit einen schnellen Vergleich verschiedener Umsetzungsmöglichkeiten für eine neue Ingenieur Anwendung in Form einer gekürzten Empfehlung zu erstellen.

iii) Anwendungsfall 3: Bestehende Entwicklung - Anwendungsgestützt

Beschreibung der Ausgangslage des Anwendenden

Im dritten Anwendungsfall liegt dem Ingenieur und der Ingenieurin bereits eine Applikation der Digitalen Realität vor. Diese kann über das Pan-Meter mit einem Pan-Faktor bewertet werden. Es gilt die Applikation mit anderen Ingenieur Anwendungen zu vergleichen und Potentiale zur Steigerung der Immersion, Präsenz und / oder Wechselwirkung herauszufinden. Die anwendenden Person wählt die Option „Anwendungsgestützt“ (siehe Abbildung 5-14).

Durchführung von HEL.P.

Wenn die Option zum dritten Anwendungsfall ausgewählt wird, erscheint kein Fragebogen, sondern ein weiterer Button zur Ermittlung des Pan-Faktors (siehe Abbildung 5-18 oben). Dieser leitet den Anwendenden auf den ersten Teil der Webseite, das Pan-Meter, weiter. Wie in Kapitel 5.1.3 detailliert beschrieben ist, ermittelt das Pan-Meter durch die Eingabe des Nutzenden den Pan-Faktor der Applikation. Der Pan-Faktor wird anschließend angezeigt und, wie ebenfalls in Kapitel 5.1.3 gezeigt, ein Vergleich mit den analysierten Anwendungen aus Tabelle A-11 in graphischer und schriftlicher Form dargestellt. Dieser basiert bereits aus den Ergebnissen von HEL.P. und wurde erst im Zuge der Entwicklung von HEL.P. dem Pan-Meter hinzugefügt.

Kehrt die anwendenden Person nach der Ermittlung des Pan-Faktors zurück zu HEL.P. z. B. über die Navigationsleiste an der Oberseite der Webseite (siehe Abbildung 5-14 oben), dann hat sich die Ansicht des Fragebogens erneut geändert (siehe Abbildung 5-18 unten). Neben dem ermittelten Pan-Faktor

taucht eine Auswahl zum eingesetzten Medium auf. Das Modell zum Pan-Faktor aus dem Pan-Meter wird im Hintergrund weiterhin bereitgehalten. Nach Eingabe des Nutzenden zur einzigen Frage wird der Fortschritt von 100 % erreicht und HEL.P. kann durchgeführt werden.

Wählen Sie aus welche Form des Fragebogens Sie beantworten wollen:

☒ Anwendungsgestützt ☐ Kurzes Szenario ☐ Detailliertes Szenario

Ermitteln Sie zunächst den Pan-Faktor Ihrer Anwendung und kehren Sie erneut zurück

Pan-Faktor ermitteln

Fortschritt: 0 %

HEL.P. durchführen

Ermittlung des Pan-Faktors mittels Pan-Meter

Wählen Sie aus welche Form des Fragebogens Sie beantworten wollen:

☒ Anwendungsgestützt ☐ Kurzes Szenario ☐ Detailliertes Szenario

Es wurde eine Anwendung VR4Teach mit dem Pan-Faktor 38 bewertet. Basierend auf diesem kann nun eine Empfehlung ausgesprochen werden.

Eingesetztes Medium:
Virtual Reality

Fortschritt: 100 %

HEL.P. durchführen

Abbildung 5-18: Screenshot der Abfrage zu Anwendungsfall 3

Ergebnis von HEL.P.

Da es sich bei dem dritten Anwendungsfall um eine Empfehlung zur Verbesserung einer bestehenden Applikation handelt, ist eine preisgünstige Variante nicht erforderlich. Im Ergebnis wird damit die erste Variante niemals ermittelt und angezeigt. Für die Variante „Optimum“ und „Zukunftsorientiert“ wird abhängig des Mediums mögliche Pan-Faktoren aus der Medienempfehlung in Tabelle A-14 herangezogen. Dabei wird anders als in den Anwendungsfällen 1 und 2 primär kein Medienwechsel angestrebt. Bei einer bestehenden Anwendung ist davon auszugehen, dass die Änderung des Mediums oftmals aufwendiger ist, als die Qualität und Quantität der Reizung zu verbessern. Mit dieser Annahme funktioniert der Algorithmus. Abhängig der eingegebenen Werte für die Immersion, Präsenz und Wechselwirkung wird für jeden Eintrag, der nicht „Keine“ beinhaltet, einzeln die Quantität auf „Vollständig“ gesetzt. Ist dies bereits der Fall, wird die Qualität um einen Wert erhöht beispielsweise von abstrakt zu realitätsnah. Liegen die Qualitäten bereits alle auf realitätsnah oder real, wird mit der Bedingung, dass nicht bereits eine AR- oder Erweiterte Virtualität-Anwendung vorliegt, ein Wechsel des Mediums vorgeschlagen. Die optimale Variante wird im Vergleich zur ursprünglichen Applikation um eine Stufe, die zukunftsorientierte Variante um zwei Stufen erhöht. Somit wird eine stufenweise Verbesserung empfohlen, die zuerst die bewerteten Elemente innerhalb der gesamten virtuellen Umgebung erhöht, anschließend die Qualitäten, die Anzahl der eingesetzten Sinnesreizungen und zuletzt den Medienwechsel. In eigener Erfahrung hat sich gezeigt, dass diese Reihenfolge dem Umsetzungsaufwand entspricht. Es ist leichter

den Anteil der Objekte in der virtuellen Umgebung zu erhöhen, deren Qualität u.ä. als das Medium zu wechseln oder weitere Wahrnehmungsformen wie die Haptik einzubinden.

Das Ergebnis wird gleichsam zu den anderen Anwendungsfällen in einer Übersicht und der Detailansicht visualisiert (siehe Anhang A.4.3). Dabei wird bei der Qualität und Quantität eines jeden Faktors der ursprüngliche und der zu empfehlende Wert angezeigt. Die Empfehlung wird mit der Erläuterung aus den Definitionen ergänzt. Eine Aussage zu Displayarten kann aufgrund der fehlenden Datenaufnahme nicht getroffen werden. Der Aufwand diese zusätzlich abzufragen, wurde als unannehmbar angenommen. Dennoch ist eine ausführliche Empfehlung generierbar.

5.3.5 Zusammenfassung von HEL.P.

In diesem Kapitel wurde gezeigt, wie das Konzept für eine Handlungsempfehlung mittels Pan-Faktor in einer interaktiven, dynamischen und kontextsensitiven Webseite umgesetzt werden kann. Es wurde das Konzept eines dynamischen Fragebogens in einer Software namens HEL.P. implementiert und in einer schlanken Ausführung die Komplexität zur Empfehlung neuer Ingenieur Anwendungen innerhalb der Digitalen Realität gelöst. Für drei verschiedene Anwendungsfälle mit dem Unterschied der Empfehlungstiefe und ob eine Applikation bereits vorliegt oder eine Neue entwickelt werden soll, ist HEL.P. umgesetzt worden. Dabei wird in jeder Empfehlung zwei bis drei Lösungsansätze präsentiert und geeignete Medien sowie der erreichbare Pan-Faktor in einem Bereich und Vergleich zu anderen aufgezeigt. Daneben kann in einer optimalen Variante Aussagen zu einsetzbare Displayarten und Empfehlungen zur Qualität einzelner Reizungen angegeben werden. Die Ergebnisse sind dabei schlank gehalten und über die Möglichkeiten des Webseiten-Designs in Form von Menüs, Tooltips und ausklappbaren Registern umfangreich ausformuliert. Diese können ebenfalls vollständig und aufbereitet als PDF-Datei exportiert werden. Mit HEL.P. ist somit eine Anwendung für Ingenieure und Ingenieurinnen geschaffen worden, die es ermöglicht ohne Vorkenntnisse eine Empfehlung basierend auf der Analyse anderer Ingenieur Anwendungen (siehe Kapitel 5.2) und hardwaretechnischen Möglichkeiten (siehe Kapitel 2.1 & 2.2) automatisiert zu erhalten. Nur mit der Grundlage des Pan-Faktors ist ein solcher Vergleich und eine solche Empfehlung möglich.

5.4 Zusammenfassung der Umsetzung

Im Rahmen der Umsetzung wurde gezeigt, wie mittels eines Pan-Meters der Pan-Faktor in Form einer Excel-Tabelle mit Makros und interaktiven Webseite umgesetzt werden kann. Die Definitionen für Qualitäten eines jeden Einflussfaktors des Pan-Faktors wurde im Konzept erarbeitet und dienen dabei als Grundlage zur Entwicklung der Software namens Pan-Meters. Um die Datenmenge und den Aufwand des Nutzenden zu reduzieren, wurde die Excel-Tabelle mit Makros erweitert. Mit diesen ist der leichte Wechsel von Definitionsbeschreibungen zur Anwendung möglich, ähnlich wie es in der Webseite mit Tooltips umgesetzt wurde. Beide Umsetzungen wurden schlicht gehalten und ermöglichen in wenigen Schritten den Pan-Faktor einer Ingenieur Anwendung zu ermitteln.

Basierend auf dem Pan-Meter wurden 102 Ingenieur Anwendungen bewertet und deren Pan-Faktor ermittelt. Existierende Applikationen aus dem Bereich von VR, AR und Erweiterte Virtualität wurden umfangreich analysiert. Diese Analyse ergab, dass aktuell ein durchschnittlicher Pan-Faktor von 38,50 PP

mit unterschiedlichen Einsatz von Medien erreicht wird. Daneben wurde basierend auf den Analysen zu unterschiedlichen Hardwaresystemen die technischen Möglichkeiten aufgezeigt und somit die Potentiale für zukünftige Ingenieur Anwendungen dargestellt (siehe Abbildung 5-9).

Diese Analyse und die Umsetzung des Pan-Faktors als Pan-Meter dienen als Grundlage einer weiteren Software, die im Rahmen dieser Arbeit mit dem Namen HEL.P umgesetzt wurde. In einer interaktiven und kontextsensitiven Webseite wurde eine Handlungsempfehlung mittels Pan-Faktor, welche im Kapitel 4.3 mit 68 Fragen konzeptioniert wurde, implementiert. Die Webseite wurde schlank und übersichtlich aufbereitet und an die bestehende Entwicklung des Pan-Meters angebunden. Mit Hilfe der Möglichkeiten kontextsensitive HTML-Seiten zu generieren und in Echtzeit Events auszuführen, konnte der dynamische Fragebogen des Konzepts umgesetzt werden. Die übersichtliche Darstellungsform, der lineare Aufbau und die Anzeige bzw. Kontrolle des Fortschritts ermöglichen eine fehlerfreie Eingabe des Anwendenden mit zusätzlicher Motivation. Für drei verschiedene Anwendungsfälle kann mit Hilfe von HEL.P eine Handlungsempfehlung zur Entwicklung einer neuen Ingenieur Anwendung ermittelt werden. Diese umfasst Aussagen zum erreichbaren Pan-Faktor, zum geeigneten Medium, der optimale Einsatz verschiedener Displaytypen sowie ein Ratschlag der umzusetzenden Qualitäten innerhalb der Immersion, Präsenz und Wechselwirkung. Die Empfehlung umfasst mindestens zwei und maximal drei verschiedene Varianten. Diese unterscheiden sich durch eine höhere Abstraktion bzw. Realismus von der optimalen Variante, welche am detailliertesten aufbereitet wird. Neben der Empfehlung einer gänzlich neuen Anwendung ist es außerdem möglich eine bereits bestehende mit anderen Anwendungen zu vergleichen und einen Vorschlag zur Verbesserung und damit höheren Pan-Faktor zu erhalten.

6 Verifizierung und Validierung des Pan-Faktors, Pan-Meters und HEL.P.

„Die erbarmungsloseste Waffe ist die gelassene Darlegung der Fakten.“ - Raymond Barre

Eine Verifizierung schreibt vor, dass durch Bestätigung eines objektiven Nachweises, die Anforderungen an eine Anwendung z. B. Software und die geforderten Eigenschaften erfüllt sind [220]. Im folgenden Kapitel soll dies für den Pan-Meter als Excel-Tabelle und interaktive Webseite sowie für HEL.P. durchgeführt und geschildert werden. Dabei werden die Anforderungen an die Software basierend auf den Formulierungen des Konzepts im lokalen System als auch der Einsatz auf einem externen Server überprüft. Es soll der einfache und funktionelle Einsatz gezeigt werden und dass die vorliegende Implementierung bereits nutzbar ist. Daneben soll geprüft werden, ob die Ergebnisse der Berechnungen für den Pan-Faktor als auch zur Ermittlung einer Handlungsempfehlungen den Zielen des Konzepts entsprechen und somit von der Software richtig erfüllt werden können.

Anschließend wird für ein reales Projekt, namens VR4Teach, HEL.P. eingesetzt, um basierend auf den Projektzielen eine Empfehlung zur Umsetzung zu erhalten. Diese Software wird den Empfehlungen entsprechend umgesetzt und mit dem Pan-Meter der Pan-Faktor durch elf Probanden ermittelt. Der Vergleich der Ergebnisse zwischen den Probanden dient als Indikator für die Objektivität des Pan-Faktors als Vergleichsparameter. Durch den realen Einsatz wird mit einem Anwendungsbeispiel die Funktionalität beider Softwarelösungen, die im Rahmen dieser Arbeit entstanden sind, validiert. Ebenfalls wird ein kleiner Einblick in das umgesetzte Projekt gegeben.

Mit einem Fazit wird das Kapitel abgeschlossen und das Endergebnis dieser Arbeit sowie der entwickelten Softwarelösungen gezogen.

6.1 Technische Verifizierung

Für eine Verifizierung ist ein objektiver Nachweis erforderlich, der sicher stellt, dass die Anforderungen erfüllt sind [220]. In der Softwaretechnologie werden dabei einzelne Funktionalitäten oder das Gesamtwerk mit bekannten Eingaben und Ergebnissen überprüft. Die Software wird als sogenannte Blackbox festgelegt und definierte Eingaben ausgeführt, von denen das Ergebnis bereits bekannt ist. Anschließend wird die Ausgabe der Software mit den Ergebnissen verglichen und somit festgestellt, ob die Blackbox technisch funktioniert und fehlerfrei durchgeführt wird. Umso mehr Eingaben getestet werden, desto größer ist das Ergebnis und so belastbarer die Verifizierung. Zur Reduktion der Tests kann alternativ die Extrema der Eingabe ausgeführt und das Resultat für die Verifizierung verwendet werden. Mit diesem Vorgang wurden die implementierten Softwarelösungen des Pan-Meters als Tabellenkalkulation und Webseite sowie HEL.P. verifiziert.

Anschließend wurden allgemeine Anforderungen, welche in den Konzeptkapiteln formuliert wurden,

soweit es möglich ist, untersucht und die Ergebnisse hier festgehalten. Anschließend wurde die Übertragung des Gesamtsystems von einem lokalen System auf einen externen Server durchgeführt und die Funktionalität erneut überprüft.

6.1.1 Funktionstest - Lokal

Zunächst wurden alle Entwicklungen auf einem lokalen System - sprich einem Personal-Computer - umgesetzt und angewandt. Dabei konnte das Vorhandensein aller nötigen Pakete, Abhängigkeiten, Internetverbindungen u.ä. sichergestellt werden. In diesem Rahmen wurde nach Abschluss der Umsetzung die Software als Blackbox behandelt und durch gezielte Tests objektiv die Stabilität und vor allem das korrekte Resultat durch die Software überprüft.

i) Funktionstest des Pan-Meters

Im Falle des Pan-Meters, welcher im Wesentlichen auf der Formel 4.10 basiert, ist dies einfach durchführbar. Mit einer bekannten Formel können definierte Werte eingegeben werden, von denen anschließend das Ergebnis bekannt ist. Wenn der Pan-Meter der Tabellenkalkulation als auch der Webseite das gleiche Ergebnis produzieren, kann die Verifizierung im Hinblick auf die Funktionalität der richtigen Berechnung als gegeben angesehen werden. Zum Test wurden hierfür vier Fälle verwendet. Jeder Fall beschreibt die Eingabe und basierend auf Formel 4.10 das Ergebnis. Die Eingaben werden jeweils innerhalb der Tabellenkalkulation und Webseite getätigt und anschließend das Ergebnis verglichen.

Die ersten beiden Fälle beschreiben das Minimum und Maximum des Pan-Faktors. Dafür wird beim Minimum jede Qualität und Quantität der Einflussfaktoren Immersion, Präsenz und Wechselwirkung mit dem Wert 0 befüllt. Dies entspricht der Aussage „Keine“ für jeden Eintrag. Es ist ein Pan-Faktor von 0 PP zu erwarten. Das Maximum dagegen definiert jede Qualität und Quantität mit dem Wert 5, was entweder „Real“ oder „Vollständig“ entspricht (siehe Tabelle 5-1). In diesem Fall soll der Pan-Faktor 100 PP entsprechen.

Sind die ersten Fälle dazu da die Extrema zu testen, sollen die weiteren zufällige Werte innerhalb der Skala beinhalten. Deshalb werden für die weiteren Fälle zufallsgenerierte Werte zwischen 0 und 5 angenommen und für alle Tests festgelegt (siehe Tabelle 6-1). Für den vierten Fall gilt zusätzlich die Bedingung, dass einmal eine Qualität mit dem Wert 0 belegt wird, wohin gegen die korrespondierende Quantität nicht 0 sein darf. Genauso soll einmal die Quantität 0 und die Qualität nicht 0 sein. Damit soll die Bedingung der Formel 4.10 überprüft werden, welche festschreibt, dass die Summe nur gebildet wird, wenn beide Werte größer 0 sind. Alle Werte können der Tabelle 6-1 entnommen werden.

Im Folgenden werden diese Werte im Pan-Meter eingetragen und das Ergebnis mit dem Pan-Faktor verglichen.

Funktionstest der Excel-Tabelle

In der Excel-Tabellenkalkulation wurde über die Combobox der entsprechende Eintrag des Werts aus Tabelle 6-1 eingetragen. Mit Hilfe der Tabelle 5-1 können dabei die Werte aus Tabelle 6-1 in die Texte übersetzt werden. Anschließend wird automatisch der Pan-Faktor berechnet und für jeden Fall mit dem Ergebnis aus Tabelle 6-1 verglichen. Es ergibt sich, dass für alle Fälle der richtige Pan-Faktor ermittelt

Tabelle 6-1: Testfälle zur Verifizierung des Pan-Faktors

Faktor	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4
	Minimum	Maximum	Zufall 1	Zufall 2
Anzahl Sinne	0	5	3	2
Qualität (visuelle W.)	0	5	2	4
Quantität (visuelle W.)	0	5	4	3
Qualität (auditive W.)	0	5	4	0
Quantität (auditive W.)	0	5	4	0
Qualität (haptische W.)	0	5	4	1
Quantität (haptische W.)	0	5	3	4
Qualität (olfaktorische W.)	0	5	0	0
Quantität (olfaktorische W.)	0	5	0	2
Qualität (gustatorische W.)	0	5	0	0
Quantität (gustatorische W.)	0	5	0	0
Qualität (Körpergefühl)	0	5	3	2
Quantität (Körpergefühl)	0	5	4	3
Qualität (Bewegung)	0	5	2	4
Quantität (Bewegung)	0	5	1	0
Qualität (Interaktion)	0	5	1	3
Quantität (Interaktion)	0	5	5	2
Qualität (Kommunikation)	0	5	0	1
Quantität (Kommunikation)	0	5	0	2
Pan-Faktor [PP]	0	100	43	29

werden konnte. Die Verifizierung zur Kontrolle der Funktionalität zur Berechnung des Pan-Faktors ist somit für die Excel-Tabellenkalkulation als erfolgreich anzusehen.

Darüber hinaus zeigte sich, dass für alle Fälle keine unaufgeforderten Fehler, Unstimmigkeiten oder Abstürze aufgetreten sind. Es ist von einer stabilen Softwarelösung auszugehen. Im Konzept werden zudem die Einfachheit, die Vereinheitlichung und die detaillierte Informationsaufbereitung gefordert. Diese können nicht objektiv getestet werden. Auch macht an dieser Stelle ein Feldversuch wenig Sinn. Allerdings kann in einer subjektiven Aussage klar formuliert werden, dass mit dem Pan-Faktor und der Lösung im Pan-Meter alle Punkte gegeben sind. Die Einfachheit ist darauf zurück zu führen, dass keine freien Eingaben, sondern auf einer Vorauswahl basierende Comboboxen die Antwortmöglichkeiten reduzieren. Dies verringert zusätzlich die Fehleranfälligkeit durch den Anwendenden auf ein Minimum. Dabei werden die ausformulierten Definitionen und die eingesetzte Makro-Technologie verwendet, um die nötigen Informationen aufzubereiten und einfach zur Verfügung zu stellen. Es wird eine übersichtliche Darstellung gewährleistet und durch verschiedene Arbeitsblätter klare Abschnitte gebildet. Die Vereinheitlichung wird durch die Definition des Pan-Faktors selbst gewährleistet. Hier wird jeder Einflussfaktor über die Qualität und Quantität in der gleichen Skala bewertet (siehe Tabelle 5-1).

Insgesamt kann die Softwarelösung des Pan-Meters als Excel-Tabellenkalkulation im Rahmen der Verifizierung als erfolgreich angesehen werden.

Funktionstest der Webseite

Auf dieselbe Weise wie die Verifizierung der Tabellenkalkulation wird die interaktive Webseite getestet. Hier werden ebenfalls die Werte aus der Tabelle 6-1 in den jeweiligen Auswahlmöglichkeiten in Textform aus Tabelle 5-1 ausgewählt. Anschließend wird der Pan-Faktor berechnet und mit der Tabelle verglichen. Alle Fälle entsprechen dem richtigen Pan-Faktor und so sind auch die Bedingungen der Formel 4.10 erfolgreich umgesetzt und erfüllt worden. Diese Funktionalität kann demnach mit den Fällen erfolgreich verifiziert werden.

Die Webseite liefert mit dem Vergleich von Anwendungen eine zusätzliche Funktionalität. Diese basiert zum Teil auf dem Konzept von HEL.P und wurde umgesetzt. Um die Richtigkeit zu verifizieren, wurden für alle Fälle jede Kategorie (Ausbildung, Planung, Ausführung & Betrieb im Bau- und Umweltwesen) ausgewählt und die Berechnung ausgeführt. Dabei wurde jeweils getestet, ob der Vergleich mit der richtigen Kategorie durchgeführt wird, die Anzahl der vergleichenden Anwendung immer dieselbe und richtige ist, und ob die Differenz zum Durchschnitt bzw. Maximum der richtige ist. Es sind demnach 16 Tests durchgeführt worden, welche alle das zu erwartende Ergebnis geliefert haben. Es konnte somit objektiv gezeigt werden, dass auch die Funktionalität des Vergleichs richtig funktioniert und fehlerfrei umgesetzt ist.

Über die objektive Methode hinaus, kann ebenfalls subjektiv eine Aussage zur Erweiterbarkeit, Einfachheit und Detaillierung getroffen werden. Die Umsetzung der interaktiven Webseite in einem schlanken übersichtlichen Format mit Anbindung von Tooltips zur Informationsmaximierung ermöglicht eine hoher Detaillierungsgrad, ohne dabei zu überfordern. Es werden nur dort Informationen eingeblendet, wo diese vom Anwendenden benötigt werden. Daneben sind mit Hilfe der festen Auswahlmöglichkeiten sowie der eben erwähnten Tooltips die Bedienung einfach und fehlerfrei möglich. Mit Hilfe der Verwendung von CSV-Tabellen als Grundlage dieser Informationen, ist die Webseite schnell und einfach erweiterbar. Informationen können ergänzt, ausgetauscht oder erweitert werden.

Mit diesen Untersuchungen zur Verifizierung kann die fehlerfreie Funktionalität des Pan-Meters und die richtige Berechnung des Pan-Faktors sowie der Vergleich mit anderen Anwendungen nachgewiesen werden. Ebenfalls kann klar gezeigt werden, dass der Pan-Faktor gegebenenfalls zu einem späteren Zeitpunkt erweitert werden kann. Die Skala der einzelnen Qualitäten bzw. Quantitäten reicht bewusst in aufsteigender Folge von 0 bis 5, um diese auch in einem zukünftigen Gebrauch erhöhen zu können. So kann es zu einem späteren Zeitpunkt eventuell relevant sein, auch Werte über die natürliche Realität mit Werten von größer 5 zu bewerten. Dies ist möglich und können die Definitionen einfach erweitert werden.

ii) Funktionstest von HEL.P.

Ist das Pan-Meter mit definierten Anwendungsfällen und Ergebnissen vergleichbar einfach zu verifizieren, stellt die Verifizierung von HEL.P eine größere Herausforderung dar. Hier ist die Funktionalität für die umgesetzten Anwendungsfälle 1 und 2 der dynamische Fragebogen zu überprüfen. Daneben ist der richtige und fehlerfreie Vergleich mit anderen Anwendungen, wie im Anwendungsfall 3, und die korrekte Aussage zum Medium, Displayarten und Qualitäten zu untersuchen.

So gilt zuerst das korrekte Ergebnis anhand der Eingabe des Nutzenden zu überprüfen und mit dem

Ergebnis aus den UML-Flussdiagrammen abzugleichen. Hierfür wurde für jede Entscheidung des Fragebogens aus Tabelle A-13 sowohl die positive als auch die negative Richtung ausgewählt und bis zum Ende des Strangs verfolgt. Das ermittelte Resultat wurde mit dem Soll-Wert aus der Entscheidungshierarchie abgeglichen. Es zeigt sich, dass die Software die Entscheidungen gemäß des Konzeptes richtig trifft und somit alle Eingaben des Nutzenden mit der richtigen Wahl innerhalb des Diagramms befolgt. Somit kann objektiv verifiziert werden, dass die vom Fragebogen definierten Ergebnismengen in Bezug auf Qualitäten und Displayarten korrekt ausgewählt werden. In diesem Zuge wurde ebenfalls die Ausgabe in der Menüstruktur kontrolliert und der Inhalt der Tooltips mit den Definitionen abgeglichen. Die Verifizierung ist positiv verlaufen.

Die Aussage zum Medium wird über die Medienempfehlung aus Tabelle A-14 erstellt. Demnach ist hier ebenfalls objektiv überprüfbar, ob die Resultate den definierten Ergebnissen entsprechen, wenn das jeweilige Medium gefiltert wurde. Auch ist die Abstraktion bzw. Steigerung der Realitätsstufe in den Empfehlungsvarianten 1 und 3 in Bezug auf Variante 2 mit den Vorgaben aus der Tabelle A-14 erstellt und kann demnach durch den Vergleich mit dem Resultat verifiziert werden. Für jede Medienart der Digitalen Realität wurde die Eingabe nach dem Fragebogen getätigt und die ermittelten Varianten mit der Tabelle A-14 verglichen. Es erfolgte ein positives Ergebnis dieser Verifizierung, da alle Ermittlungen richtig durch die Software erfolgt sind.

Es kann des Weiteren verzeichnet werden, dass bei all den durchgeführten Tests keine Abstürze oder unerwarteten Ereignisse aufgetreten sind. HEL.P ist damit als stabile Software umgesetzt worden. Die geforderte ingenieurspezifische Aussage der Handlungsempfehlung kann über den Vergleich mit ausschließlich digitaler Ingenieurmethoden bzw. -applikationen umgesetzt und als geprüft angesehen werden. Die weiteren Anforderungen des Konzeptes in Bezug auf die Individualität, Einfachheit, Dynamik und Aussagekraft können wiederum nicht objektiv, sondern nur subjektiv bewertet werden. Die Individualität ist bis zu einem bestimmten Grad gewährleistet, da die Ergebnisse basierend auf den Eingabe des Nutzenden zusammengestellt werden. Es findet somit ein individuelles Ergebnis statt, welches aber bei selber Eingabe identisch erfolgt. Die Individualität wird durch angepasste und unterschiedliche Ergebnisse für die Wahl des Mediums, verschiedene Displayarten und Qualitäten umgesetzt. Dies ermöglicht zusätzlich eine hohe Aussagekraft in Bezug auf den Antworten des Nutzenden. Ähnlich wie beim Pan-Meter kann die Einfachheit durch den Einsatz vordefinierter Auswahlmöglichkeiten, die Informationsbereitstellung durch Tooltips, die lineare Führung über die Stepper als auch der Einsatz einer Fortschrittsanzeige implementiert werden. Die Webseite von HEL.P ist übersichtlich und linear aufgebaut, um eine einfache Verwendung zu gewährleisten. Das wird außerdem durch die umgesetzte und vom Konzept geforderte Dynamik des Fragebogens unterstützt. Diese stellt sicher, dass nur Fragen angezeigt werden, die beantwortet werden müssen. Die Dynamik kann vollständig und fehlerfrei umgesetzt und das Design damit schlank und übersichtlich gestaltet werden.

HEL.P kann insgesamt als funktionstüchtig und einsatzfähig beschrieben werden.

6.1.2 Funktionstest - Netzwerk

Im vorausgegangenen Kapitel wurden die durchgeführten Tests zur Verifizierung der Funktionalitäten des Pan-Meters als auch von HEL.P beschrieben. Dabei sind diese Tests in einem lokal aufgesetzten System durchgeführt worden. Die Webseite wurde am eigenen Rechner gehostet, an dem alle nötigen Pakete

installiert und Verknüpfungen gewährleistet werden konnten. Darüber hinaus wurde das gesamte Projekt erzeugt und als stabile alleinstehende Applikation gebildet. Dies konnte bereits fehlerfrei und problemlos durchgeführt werden. Um allerdings die Funktionalitäten wie im vorausgegangenen Kapitel überprüfen zu können, wurde die Webseite auf einen externen Server installiert. Hierfür stand ein Ubuntu-Server (Version 18.04.3 LTS¹) mit vorinstallierten Apache HTTP-Server (Version 2.4.29-1ubuntu4.11²) zur Verfügung. Die gebildete Applikation von Pan-Meter und HEL.P wurde in das Dateisystem des Servers kopiert und im jeweiligen Verzeichnis der index.html des Apache HTTP-Servers eingefügt. Zusätzlich wurden Node.js (Version 12.14.1³) und der Paketmanager npm (Version 6.13.4⁴) auf dem Ubuntu-Server installiert. Dadurch ist es der Anwendung möglich alle nötigen Pakete innerhalb von HEL.P und dem Pan-Meter selbstständig zu beziehen und über den Service von Node.js ausgeführt zu werden. Diese Schritte waren ausreichend, um dem Apache HTTP-Server die Kenntnisse zu vermitteln, welche Seite beim Aufruf der HTML-Seite geöffnet werden muss und dass alle Funktionalität sichergestellt sind.

Anschließend wurde über drei verschiedene Computersysteme, sowie einem Smartphone und einem Tablet die Webseite im Netzwerk aufgerufen. Alle Geräte konnten die Webseite fehlerfrei aufrufen. Allerdings ist die Darstellung nicht für alle Bildschirmgrößen ($\hat{=}$ Smartphone) optimiert. Es ist kein vollständiges Responsive-Design umgesetzt, sondern nur bis zu einem gewissen Grad eine Anpassung möglich. Mit dem Smartphone und Tablet ist eine Touch-Eingabe anstatt der Interaktion mit Maus und Tastatur möglich. Die Funktionalitäten für das Pan-Meter als auch HEL.P sind für alle Geräte erfolgreich einsetzbar. Es wurden die gleichen Tests, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, durchgeführt, um die Funktionalitäten auch im externen Betrieb zu verifizieren. Dies verlief ebenfalls ohne Fehler und unerwartete Ereignisse. Die Verifizierung kann damit auch im externen Betrieb als erfolgreich angesehen werden.

Die als vorher problematisch angesehenen Anbindungen an externe Bibliotheken wie beispielsweise Google Charts oder Papa Parse konnte nicht bestätigt werden und so werden die Daten erfolgreich geladen und die Diagramme richtig und interaktiv dargestellt. Der Aufwand zum Einsatz über das World Wide Web ist damit sehr gering und die Umsetzung bereits jetzt einsetzbar. Eine öffentliche HTML-Seite wird allerdings erst nach Veröffentlichung dieser Arbeit angestrebt.

Die Verifizierung der implementierten Softwarelösungen Pan-Meter und HEL.P können damit erfolgreich abgeschlossen werden. Gleichzeitig kann ein Einsatz über den Rahmen dieser Arbeit hinaus durch die einfache Anbindung einer Serverstruktur aufgezeigt werden.

6.2 Validierung anhand der Durchführung und der Umsetzung von „VR4Teach“

Neben der Verifizierung kann eine Validierung der Software und der Konzepte für den Pan-Faktor als auch einer Handlungsempfehlung durchgeführt werden. Dabei ist eine Validierung ein objektiver Nachweis, ob die Anforderung für eine bestimmte Anwendung oder einen bestimmten Gebrauch erfüllt werden können [220]. Im folgenden Kapitel soll dies mit Hilfe des am IIB durchgeführten Projekts VR4Teach erläutert werden. Der Vorteil des Einsatzes einer realen Anwendung sind die echten Anforderungen,

¹ <https://ubuntu.com/download/server> Aufgerufen am 29.01.2020.

² <https://packages.ubuntu.com/bionic/httpd/apache2-bin> Aufgerufen am 29.01.2020.

³ <https://nodejs.org/en/> Aufgerufen am 29.01.2020.

⁴ <https://www.npmjs.com/get-npm> Aufgerufen am 29.01.2020.

Umsetzungsergebnisse und Beschreibungen als Datengrundlage für die Durchführung von HEL.P und dem Pan-Meter.

Mit Hilfe definierter Projektziele soll eine Handlungsempfehlung erstellt werden, welche einen Aufschluss darauf gibt, welches Medium, welche Displayarten und Qualitäten umzusetzen sind. VR4Teach wurde vom IIB (Michael Disser, B.Sc.; Christian Eller, M.Sc.; Pascal Mosler, B.Sc.) mit den Vorgaben der Empfehlung erfolgreich implementiert und durch das Institut für Werkstoffe im Bauwesen (Christoph Mankel, M.Sc.; Shifan Zhang M.Sc.) mit Inhalten gefüllt. Die Idee zu dem Projekt stammt vom Autor und entstand unter seiner Leitung. Zum Abschluss wurde es im realen Umfeld getestet. Eine vollständige Dokumentation von VR4Teach steht zur Verfügung. Es handelt sich um eine reale Ingenieur Anwendung der Kategorie Ausbildung, welche als solche mit einem Pan-Faktor bewertet werden kann. Deshalb wird mit Hilfe des Pan-Meters der Pan-Faktor bestimmt und mit den Voraussagen der Handlungsempfehlung aus HEL.P verglichen. Die Erkenntnisse dieses Vergleichs sollen einen Aufschluss darauf geben, ob die Handlungsempfehlung funktioniert, umsetzbar ist und ob der Pan-Faktor als vergleichender Parameter geeignet ist. Das Beispiel soll die Leichtigkeit und Durchführbarkeit dieser Arbeit aufzeigen und mit realen Daten validieren.

Details zum Projekt in Form der Projektziele als auch der Umsetzung werden im folgenden Abschnitt erläutert. Zusätzlich wird anhand dieses realen Anwendungsbeispiels HEL.P genutzt, um eine Empfehlung zu generieren. Anschließend wird VR4Teach mit dem Pan-Meter bewertet und der Pan-Faktor ermittelt. Die Resultate sind in diesem Abschnitt aufgeführt.

6.2.1 Anforderungen und Ziele des Projekts VR4Teach

Die Idee zu VR4Teach entstammt der zunehmenden Digitalisierung der Lehre. Durch weitere digitale Inhalte soll der Zugang für Studierende motivierend aufbereitet und somit die Attraktivität der Vorlesung gesteigert werden. Gleichzeitig soll der Einsatz einfach und schnell durchführbar gestaltet sein. VR4Teach hat das Ziel, wie der Name bereits sagt, das Medium der VR in der Lehre und primär in der Vorlesung für Lehrende und Studierende nutzbar zu machen. Damit soll ein Raumgefühl entstehen, das das Verständnis der Studierenden steigern soll. Ebenso sollen alle Beteiligten einer virtuellen Vorlesung in der gleichen virtuellen Umgebung sein und der Lehrende als administrative Person durch das Geschehen führen. Interaktionen mit der virtuellen Umgebung sollen der Administration ermöglicht werden, um beispielsweise einzelne Elemente zu markieren, Aktionen durchzuführen, die Position zu ändern u.ä. Diese Eingabe des Nutzens sollen für alle anderen Teilnehmenden ebenfalls in Echtzeit visualisiert bzw. durchgeführt werden. Dabei soll jeder Studierende eine teilnehmende Person sein und zur einfachen Anbindung das eigene internetfähige Gerät nutzen können. Den Studierenden soll die Möglichkeit gegeben werden, die Aktionen und Markierungen der Administration ebenfalls wahrnehmen zu können und dazu den räumlichen Bezug durch eine 360°-Ansicht immersiv zu erleben. Darüber hinaus soll die freie Interaktion zur räumlichen Drehung individuell beeinflussbar sein.

VR4Teach ist demnach als Projekt gedacht, welches innerhalb einer Vorlesung die Inhalte dieser in digitalen räumlichen Modellen visualisiert und über Kollaboration die Interaktionen des Lehrenden mit den Studierenden teilt. Damit wird eine virtuelle Exkursion mit der Möglichkeit zur realen ortsunabhängigen Darstellung angestrebt. Die Vorteile sind die wartungsfreien Modelle, das Gefühl der Studierenden

ohne Sichtbehinderung das Gezeigte zu erleben und die immersive Visualisierung zur Steigerung der Motivation.

6.2.2 Durchführung von HEL.P. für VR4Teach

Mit den zuvor beschriebenen Anforderungen lässt sich HEL.P. in der interaktiven Webseite durchführen. Hierbei soll ebenfalls überprüft werden, ob der Wunsch zur Nutzung von VR geeignet ist, um diese Idee umzusetzen. Für eine genaue und ausführliche Empfehlung wird zunächst das detaillierte Szenario gewählt, wodurch Fragen bezüglich aller Bereiche angezeigt werden. Von den 68 Fragen müssen 39 beantwortet werden. Die beantworteten Fragen und die eingegebenen Antworten sind der Tabelle 6-2 zu entnehmen. Die restlichen Fragen müssen aufgrund der implementierten Synergieeffekte bzw. Verknüpfungen oder eingeschlagenen Abzweigungen innerhalb der Entscheidungshierarchie nicht beantwortet werden.

Tabelle 6-2: Antworten für VR4Teach innerhalb von HEL.P.

Frage	Antwort	Frage	Antwort	Frage	Antwort
1.1	Ausbildung	3.II.1	Ja	4.I.a.1.1.1	Nein
1.2	Nein	3.II.1.1.a.1	Ja	4.II.a.1	Ja
1.3	Nein	3.II.1.a.1.2	Ja	4.II.a.1.1	Ja
2.1	Ja	3.II.1.a.1.1	Nein	4.II.a.1.1.1	Nein
2.1.1	Ja	3.II.1.a.1.1.1	Nein	4.II.b.1.1.a	Nein
2.1.1.1	Ja	3.II.1.b.1	Nein	4.II.b.1.1.b	Nein
2.1.1.1.1	Ja	3.III.1	Ja	5.I.1	Ja
2.1.1.1.1.1	Ja	3.III.1.1	Nein	5.I.1.1	Ja
2.1.1.1.1.1.1	Nein	3.III.1.1.1	Ja	5.I.1.1.1	Ja
3.I.a.1	Ja	3.IV.1	Nein	5.I.1.1.1.1	Nein
3.I.a.1.1	Ja	3.V.1	Nein	5.I.1.1.1.1.2	Nein
3.I.b.1	Ja	4.I.a.1	Ja	5.II.1	Ja
3.I.b.1.1.2	Nein	4.I.a.1.1	Ja	5.II.1.1	Nein

Nach der vollständigen Eingabe und Beantwortung aller Fragen ist der Fortschritt von 100 % erreicht und es kann die Empfehlung ermittelt werden. Das Resultat beschreibt drei Lösungsvarianten für VR4Teach. Das vollständige Ergebnis ist über die implementierte Exportfunktion als PDF erstellt und die Datei dem Anhang A.4.3 beigelegt worden.

Die preisgünstige Variante wird mit einem möglichen Pan-Faktor von 30 PP eingestuft. Im Vergleich zu bereits existierenden Anwendungen der Kategorie Ausbildung ist damit der Durchschnitt mit 10 PP unterschritten aber noch oberhalb des Minimums. In dieser Variante wird als Medium die Möglichkeit von 360°-Videos oder -Fotos vorgeschlagen. Diese werden kurz erklärt und bereits ein Hinweis auf die bessere Nutzung von VR gegeben.

In der optimalen Variante wird das Medium VR als ideal angegeben. Dies entspricht der Erwartung und spiegelt die Anforderungen korrekt wider. In dieser Variante ist ein Pan-Faktor von 32 bis 61 PP als er-

reichbar anzusehen. Dabei entspricht der untere Bereich einer Umsetzung mit geringer und der obere einer Umsetzung mit vollständiger Quantität. Die Empfehlung verspricht bei Einhaltung der Vorgaben eine gute bis überdurchschnittliche Anwendung im Vergleich zu anderen Applikationen in der Kategorie Ausbildung. Im Detail werden für die visuelle Wahrnehmung Displays des Typs On-Body-Display und der Konkretisierung Head-Mounted-Display in den Ausführung See- und Non-See-Through als geeignet vorgeschlagen. Für den Bereich der auditiven Wahrnehmung wird erkannt, dass keine Mobilität des Nutzenden erforderlich ist, weshalb die World-Fixed-Displays vorgeschlagen werden. Die Haptik soll mit einem Hand-Held-Display umgesetzt werden, welche auch gleichzeitig für das Körpergefühl und die Fortbewegung genutzt werden soll. Wie die Datei im Anhang A.4.3 auflistet, wird die Umsetzung der Qualität für die visuelle und auditive Wahrnehmung in der Form realitätsnah angeraten. Die der haptischen Repräsentation, wie auch die Bewegung, Interaktion und Kommunikation als einfach und das Körpergefühl wird mit abstrakt empfohlen. Für die olfaktorische und gustatorische Wahrnehmung werden weder Displays noch Qualitäten vorgeschlagen, da diese Sinne nicht mit eingebunden werden sollen. Zu jedem Vorschlag wird eine Erklärung in Prosa, den Kennwerten für Freiheitsgrade und Anwendungsbereich sowie ein Beispiel geliefert. Als zusätzliche Empfehlung wird die Kommunikation als Funktions- und Datenaustausch sowie eine Bewegung in Form einer Teleportfunktion als geeignet angesehen. Die zukunftsorientierte Variante ist wie die erste Variante ein kurzer Vorschlag mit Vergleich und Medium. Hier wird als Steigerung von VR eine Erweiterte Virtualität-Anwendung vorgeschlagen und somit die Einbindung realer Gegenstände in die virtuelle Umgebung empfohlen. Bei einer solchen Umsetzung ist davon auszugehen, dass ein Pan-Faktor von 70 PP erreicht werden kann. Im Vergleich zu anderen Applikationen wäre dies eine Steigerung von 13 PP zum bisherigen Maximum. Mit diesem Ergebnis ist HEL.P abgeschlossen und eine ausführliche Empfehlung zur Umsetzung von VR4Teach vorhanden. Das Resultat konnte erfolgreich exportiert und dieser Arbeit hinzugefügt werden (siehe Anhang A.4.3). Diese kann im Weiteren verwendet werden, um das Projekt zu implementieren.

6.2.3 Umsetzungsergebnisse des Projekts

Mit der vorliegenden Handlungsempfehlung und den darin enthaltenden Beschreibung zur Nutzung von Displayarten und Umsetzung verschiedener Qualitäten wurde VR4Teach implementiert. Dabei wurde bewusst darauf geachtet, ob die Empfehlung im Anbetracht der Projektziele und -anforderungen Sinn machen. Im Hinblick auf den Einsatz in einer Vorlesung, was einen kurzen Aufbau und großen Gruppengrößen entspricht, musste die Empfehlung validiert werden. Es ergab sich, dass die Vorschläge und Resultate der Empfehlung für die Umsetzung der Idee von VR4Teach sinnvoll sind.

Für VR4Teach wurden zwei unterschiedliche Systeme entwickelt, welche über einen Datenaustausch innerhalb des World Wide Webs miteinander verbunden sind (siehe UML-Komponentendiagramm Abbildung 6-1). Beide Anwendungen sind dabei, wie durch HEL.P vorgeschlagen, für Head-Mounted-Displays in Form von Cardboards umgesetzt. Der eine Teil der Applikation entspricht einer Android App (Android 7.0 API Level 24) zur Anbindung von Google Daydream⁵ (Version Android 7). Dieser Teil von VR4Teach steht der Administration also der lehrenden Person zur Verfügung. Mit mehr Rechten versehen kann diese mit Hilfe des per Bluetooth verbundenen Daydream Hand-Controller ($\hat{=}$ Hand-

⁵ <https://arvr.google.com/daydream/> Aufgerufen am 31.01.2020.

Held-Display) durch das Geschehen führen. Dafür stehen der Administration verschiedene Interaktionsmöglichkeiten zur Verfügung. Diese können über ein internes Menü ausgewählt und dann durch Zeigen mit dem Hand-Controller auf einen virtuellen Gegenstand in der virtuellen Umgebung ausgeführt werden (siehe Abbildung 6-2 (3)). Implementierte Interaktionen sind das Markieren, Explorieren, Bewegen, Rotieren, Vergrößern, Verkleinern und Aktivieren von Gegenständen bzw. Simulationen. Die Fortbewegung in Form der Positionsänderung ist mit einem Teleport, wie in HEL.P geraten, umgesetzt worden (siehe Abbildung 6-2 (4)). Hierfür wählt die Administration die Funktion aus und zeigt mit dem Hand-Controller auf die gewünschte Position, anschließend wird durch einen Klick die Auswahl bestätigt und die administrative Person an die Stelle teleportiert. Die teilnehmenden Studierenden erhalten automatisch diese Positionsänderung und werden ebenfalls an die gleiche Stelle befördert. Dies geschieht durch die Datenübertragung über das Netzwerk mit den Informationen der neuen Position als 3D-Vektor. Die Rotation der Administration findet über die reale Drehung des Kopfes oder Körpers statt. Dies steigert das Körpergefühl, welches bei der Administration über die virtuelle Repräsentation des Hand-Held-Displays in der virtuellen Umgebung und der Bewegung in natürlicher und künstlicher Realität gesteigert wird. Dies wurde ausdrücklich in HEL.P geraten.

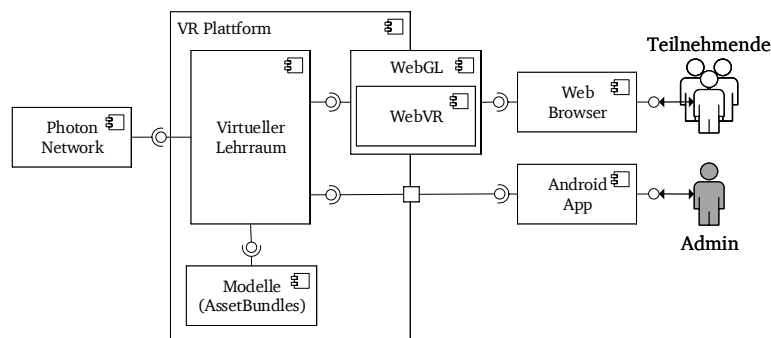


Abbildung 6-1: UML-Komponentendiagramm von VR4Teach (enthalten in [91])

Für den Ton kann entweder der integrierte Lautsprecher über Kopfhörer für den Anwendenden verwendet werden oder die Administration kann die eigene Anwendung über Bluetooth bzw. Kabel mit den fixierten Lautsprechern des Hörsaals verbinden. Somit kann der Sound über World-Fixed-Display übertragen werden.

Der andere Teil der Umsetzung von VR4Teach betrifft die Applikation der Teilnehmenden bzw. Studierenden. Hier wurde mit Hilfe von WebGL⁶ (Version 2.0) und WebVR⁷ (Version 1.6.0) eine Webseite erstellt und im World Wide Web gehostet, welche somit von allen internetfähigen Geräten aufgerufen werden kann. Der Studierende wählt sich in die virtuelle Vorlesung ein und erhält automatisch eine 3D-Ansicht der virtuellen Umgebung (siehe Abbildung 6-2 (1)). Hier kann der Studierende über die Maus, Tastatur oder Touch interagieren und die Blickrichtung ändern. Nutzt die teilnehmende Person ein Smartphone kann in die immersive VR-Ansicht gewechselt werden (siehe Abbildung 6-2 (2)). Die Bewegungsinteraktion ändert sich dadurch auf die reale Rotation des Nutzens, wodurch ein Körpergefühl entsteht und die Blickrichtung durch Körper- oder Kopfdrehung gewählt werden kann.

Verbunden sind beide entwickelten Applikationen über das World Wide Web und tauschen über den

⁶ <https://get.webgl.org/> Aufgerufen 31.01.2020.

⁷ <https://webvr.info/> Aufgerufen am 31.01.2020.

Einsatz des Photon Networks⁸ (Version 4.1.1.19) Daten in Echtzeit miteinander aus. Der Ablauf wird abhängig der wesentlichen Beteiligten in Abbildung 6-3 als BPMN-Diagramm veranschaulicht. Bei der Nutzung von VR4Teach legt die Administration zunächst durch die Wahl eines Modells vom Server ein Szenario an und erhält zusätzlich einen PIN. Dieser kann in der Vorlesung verbreitet werden und dient den Studierenden, um auf der Webseite mit dem Szenario des Lehrenden verknüpft zu werden. Das Szenario wird daraufhin bei allen Teilnehmenden geladen, so dass jeder Beteiligte in der eigenen lokalen Version und virtuellen Umgebung ist. Dennoch sind alle über das Netzwerk miteinander verbunden. Solange der Lehrende Interaktionen durchführt und Aktionen auslöst, werden diese mit allen synchronisiert und somit ebenfalls vorgenommen.

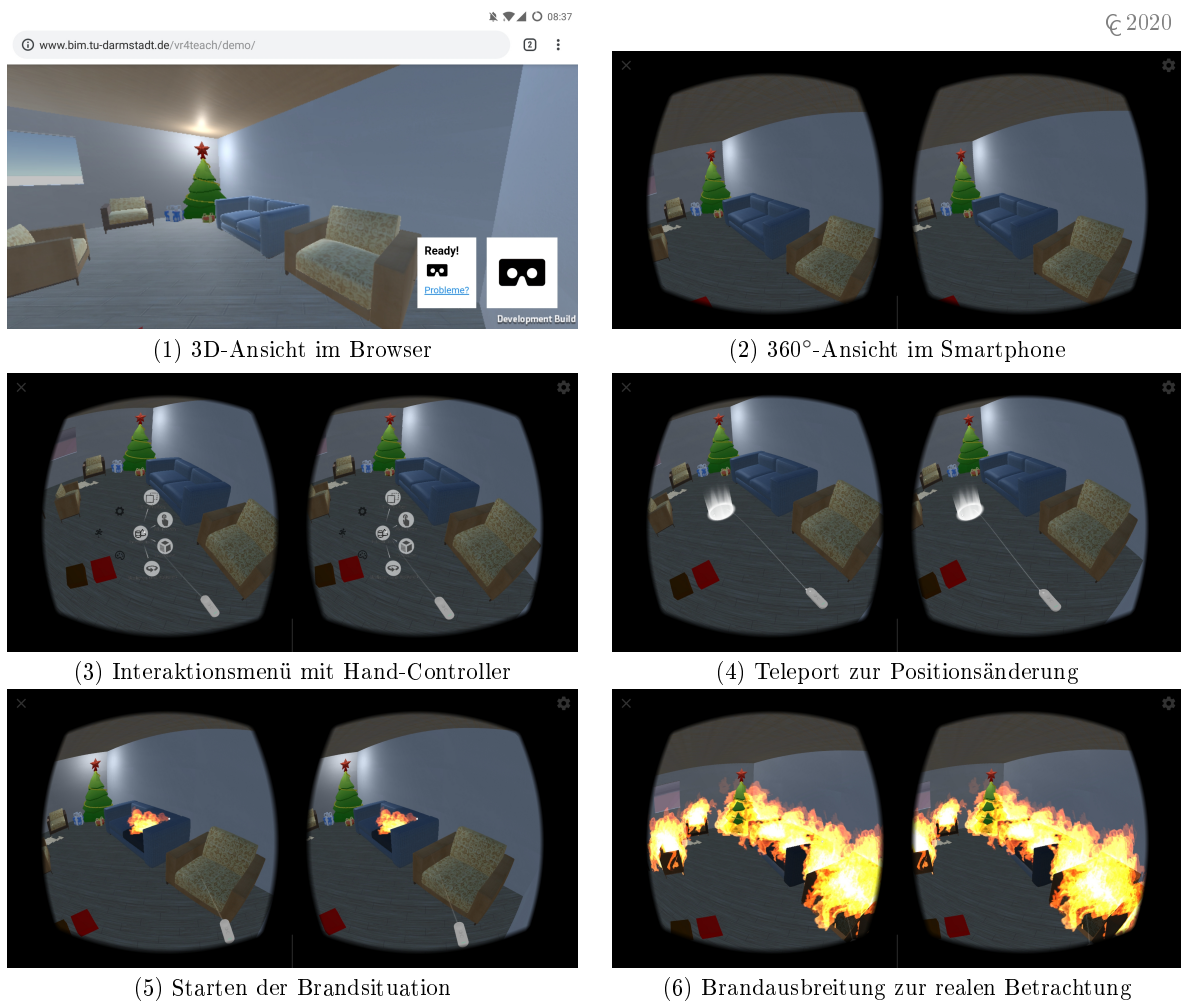


Abbildung 6-2: Screenshot einiger Umsetzungsergebnisse von VR4Teach
(teilweise enthalten in [93])

In dem Demonstrator für VR4Teach wurde hierfür eine reale Simulation des Instituts für Werkstoffe im Bauwesen verwendet, welche die Brandausbreitung eines Wohnungsbrandes nachempfunden. Für Studierende sollte somit in einer ungefährlichen und immersiven Visualisierung die theoretischen Formeln real erlebbar gestaltet werden (siehe Abbildung 6-2 (5) & (6)). Hierfür wurde, wie durch HEL.P emp-

⁸ <https://www.photonengine.com/> Aufgerufen am 31.01.2020.

fohlen, das Modell in seinem optischen Erscheinungsbild realitätsnah umgesetzt. Der Sound, verursacht durch die Brandgeräusche, mit der Möglichkeit der auditiven Lokalisation ist einfach umgesetzt worden, da der Fokus auf der Stimme des Lehrenden direkt im Hörsaal lag. Die olfaktorische und gustatorische Wahrnehmung wird nicht bespielt. Ein Video der Umsetzung kann auf <https://youtu.be/3cEqMto95T0> (Stand 31.01.2020) betrachtet werden.

VR4Teach wurde nach erfolgreicher Implementierung in der Vorlesung mit dem Thema Brandverhalten im realen Einsatz validiert [93]. Hier ergab sich, dass die Studierenden das immersive Erlebnis zur Unterstützung der theoretischen Inhalte sehr begrüßen und das Medium von VR in dieser Form der Nutzung ansprechend ist. Probleme konnten durch die Validierung in Form der Weblösung gefunden werden, da nicht alle Betriebssysteme standardmäßig WebGL unterstützen oder aufgrund des Alters die Technik nicht verwenden können. Generell wird VR4Teach als erfolgreiches Projekt angesehen und können die Erkenntnisse für weitere Entwicklungen genutzt werden. Näheres ist auch in Eller und Zhang [93] zu finden.

Betrachtet man nach der Umsetzung anschließend nochmals die Variante 2 der Handlungsempfehlung in Anhang Abbildung A-10, wird deutlich, dass die Umsetzung größtenteils und überwiegend den Ratschlägen entspricht und Displayarten und Qualitäten als auch das Medium umgesetzt werden konnten. Die erfolgreiche Umsetzung als auch das zufriedenstellende Ergebnis von VR4Teach zeigt, dass HEL.P genutzt werden kann, um eine einsatzfähige und funktionelle Handlungsempfehlung zu erhalten. Die Validierung von HEL.P mittels eines realen Projekts ist damit als erfolgreich anzusehen.

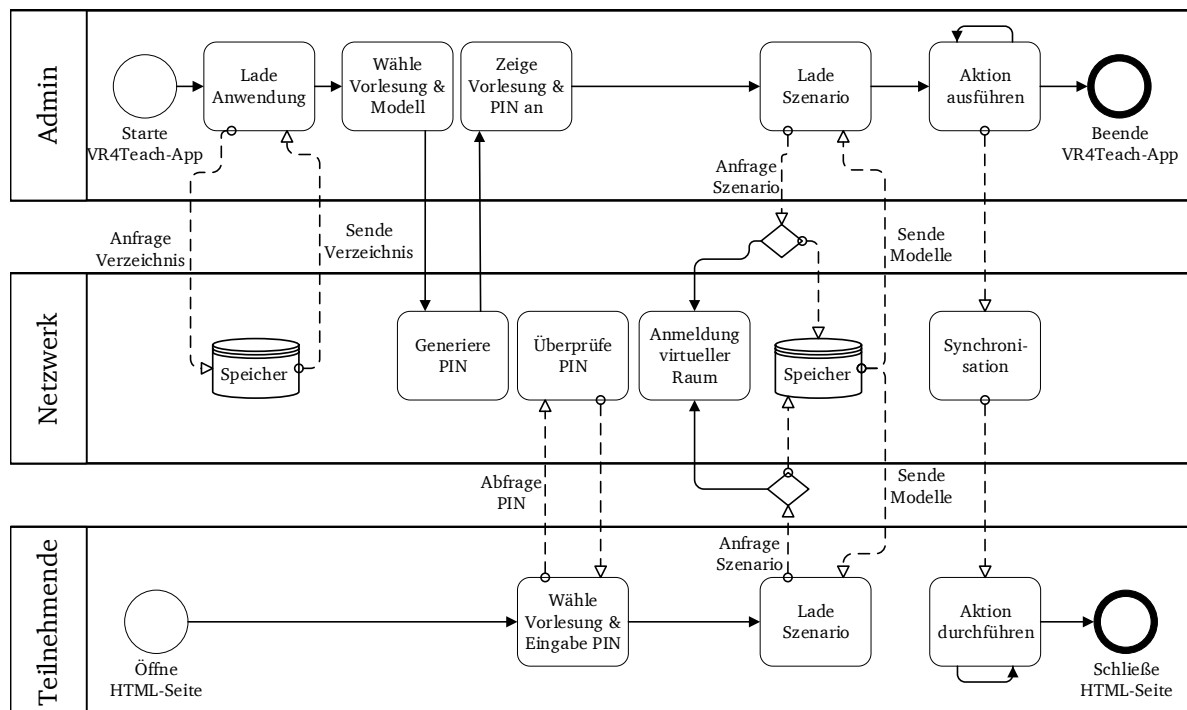


Abbildung 6-3: UML-Ablaufdiagramm zur Ausführung von VR4Teach

6.2.4 Durchführung des Pan-Meters

Nach der Implementierung und getesteten Durchführung von VR4Teach stellt sich die Frage, welchen Pan-Faktor die Applikation tatsächlich erreicht. Hierfür wird mit der Beschreibung von VR4Teach aus dem vorausgegangenen Kapitel der Pan-Meter ausgeführt, um den Pan-Faktor zu erhalten. Mit objektiven Aussagen zu einem realen Projekt kann das Pan-Meter und der Pan-Faktor validiert werden. Es wird der Pan-Meter der interaktiven Webseite und der Excel-Tabellenkalkulation verwendet. Das Resultat der Excel-Tabellenkalkulation ist bereits in Abbildung 5-2 zu sehen. Das Ergebnis der Webseite wird über die Funktionalität als PDF-Datei exportiert und ist dem Anhang A.4.2 beigelegt. Um diese Ergebnisse zu erhalten wurde Eingaben getätigt, die der Tabelle 6-3 zu entnehmen sind.

Tabelle 6-3: Antworten für VR4Teach innerhalb des Pan-Meters

Frage	Antwort	Frage	Antwort	Frage	Antwort
Name	VR4Teach	H _{qn}	wenig	B _{ql}	einfach
Bereich	Ausbildung	O _{ql}	keine	B _{qn}	wenig
V _{ql}	realitätsnah	O _{qn}	keine	I _{ql}	einfach
V _{qn}	viele	G _{ql}	keine	I _{qn}	viele
A _{ql}	einfach	G _{qn}	keine	KO _{ql}	einfach
A _{qn}	einige	K _{ql}	abstrakt	KO _{qn}	vollständig
H _{ql}	schematisch	K _{qn}	wenig		

Hinweis: V : Visuelle Wahrnehmung
A : Auditive Wahrnehmung
H : Haptische Wahrnehmung
O : Olfaktorische Wahrnehmung
G : Gustatorische Wahrnehmung
K : Körpergefühl
B : Bewegung
I : Interaktion
KO: Kommunikation
ql : Qualität
qn : Quantität

Die Ergebnisse unterscheiden sich in der Umsetzungsqualität in wenigen Punkten von der Handlungsempfehlung. Dies sind zum einen die Qualität für die auditive Wahrnehmung, welche mit einfach bewertet wird. Dies liegt daran, dass zwar eine realitätsnahe Umsetzung möglich ist, aber in dem bereitgestellten Modell noch nicht umgesetzt wurde. Da es sich um eine Vorlesung handelt und der Lehrende aktiv durch das Geschehen führen soll, muss seine Stimme innerhalb der natürlichen Realität andere Geräusche überragen. Deshalb wurde die auditive Reizung nur beispielhaft in einer einfachen Qualität umgesetzt. Auch wird die Bewertung der Haptik herabgestuft, da der Hand-Controller von Google Daydream keine Vibrationsfunktion und somit kein haptisches Feedback ermöglicht. Es ist zu beachten, dass

immer die beste Qualität zu bewerten ist. Diese tritt bei VR4Teach meist in der Anwendung der Administration auf. Deshalb wird diese bewertet, aber erhält geringe Quantitäten, da die meisten Nutzenden Teilnehmende sind. So wäre beispielsweise das haptische Feedback für die Teilnehmenden nicht vorhanden. Die Quantitäten werden aufgrund der Anzahl der Elemente bestimmt, hierfür lag die Anwendung in allen Details vor.

Sind diese Werte eingetragen kann der Pan-Faktor über das Pan-Meter ermittelt werden. Insgesamt ergibt sich für die Applikation VR4Teach ein Pan-Faktor von 38 PP. Die Anwendung VR4Teach liegt damit im Bereich der meisten analysierten Ingenieur Anwendungen der Digitalen Realität. Der Anteil an Immersion liegt bei 19 PP, der Präsenz bei 7 PP und der Anteil der Wechselwirkung bei 12 PP. Es sind 33 Anwendungen in der Kategorie Ausbildung hinterlegt. Hier beträgt der durchschnittliche Pan-Faktor 40 PP. Das Maximum liegt bei 57 PP und das Minimum bei 14 PP. VR4Teach liegt damit knapp unter dem Durchschnitt sonstiger Ingenieur Anwendungen.

Um die Objektivität des Pan-Faktors und damit seine Aussagekraft zu überprüfen, wurden zusätzlich in einer Befragung elf Ingenieure und Ingenieurinnen aufgefordert den Pan-Faktor von VR4Teach zu ermitteln. Die Probanden sind alle im Bereich der digitalen Ingenieurmethoden in unterschiedlichen Schwerpunktbereichen tätig und sowohl männlich als auch weiblich im Alter zwischen 20 bis 33 Jahren alt. Somit ist keine repräsentative Befragung erfolgt, aber lassen die Ergebnisse über den auftretenden Wertebereich auf die Objektivität des Pan-Faktors und dessen Ermittlung schließen. Es stellt sich die Frage, ob alle Probanden den gleichen oder naheliegenden Pan-Faktor ermitteln oder ob große Schwankungen diesen in Frage stellen. Den Probanden lag das YouTube-Video⁹ zu VR4Teach, der beschriebene Inhalt von VR4Teach in Kapitel 6.2.1 und die Definitionen für Qualität und Quantität im Pan-Faktor aus dem Konzept vor (siehe Tabelle 4-2 ff.). Mit diesen Angaben bewerteten alle Teilnehmenden die Qualität und Quantität des Pan-Faktors, welcher anschließend durch das Pan-Meter ermittelt wurde. In Abbildung 6-4 sind die Ergebnisse der Probanden veranschaulicht (siehe Tabelle A-15). Es ist eindeutig, dass die Bewertung aller Teilnehmenden im Bereich des erwarteten Pan-Faktor liegen und es somit keine großen Schwankungen gibt. Die Ergebnisse treten zwischen 38 und 42 PP auf und ergeben einen Durchschnitt von 40 PP. Dieser liegt leicht über den erwarteten 38 PP. Dies liegt daran, dass die Informationen über die Quantitäten einzelner Qualitäten für die Probanden ohne das Durchführen der Anwendung VR4Teach schwer zu bemessen war. Es erfolgten Schätzungen, die zu diesen minimalen Schwankungen führten. Es ist damit gezeigt, dass der Pan-Faktor als Vergleichsparameter funktioniert, aber eine detaillierte Informations- bzw. Anwendungsbeschreibung nötig ist. Die Durchführung des Pan-Meters und die objektive Berechnung des Pan-Faktors zeigt, dass das Pan-Meter auch mit einem realen Projekt eingesetzt werden kann. Außerdem kann durch die Befragung als Indikator die Aussage getroffen werden, dass der Pan-Faktor durch verschiedene Anwendende mit dem gleichen bzw. naheliegenden Werten ermittelt werden kann. Die Validierung des Pan-Meters mittels eines realen Projekts und der Pan-Faktor als objektiver Vergleichsparameter sind damit als Erfolg anzusehen.

⁹ <https://www.youtube.com/watch?v=3cEqMto95T0&t=35s>

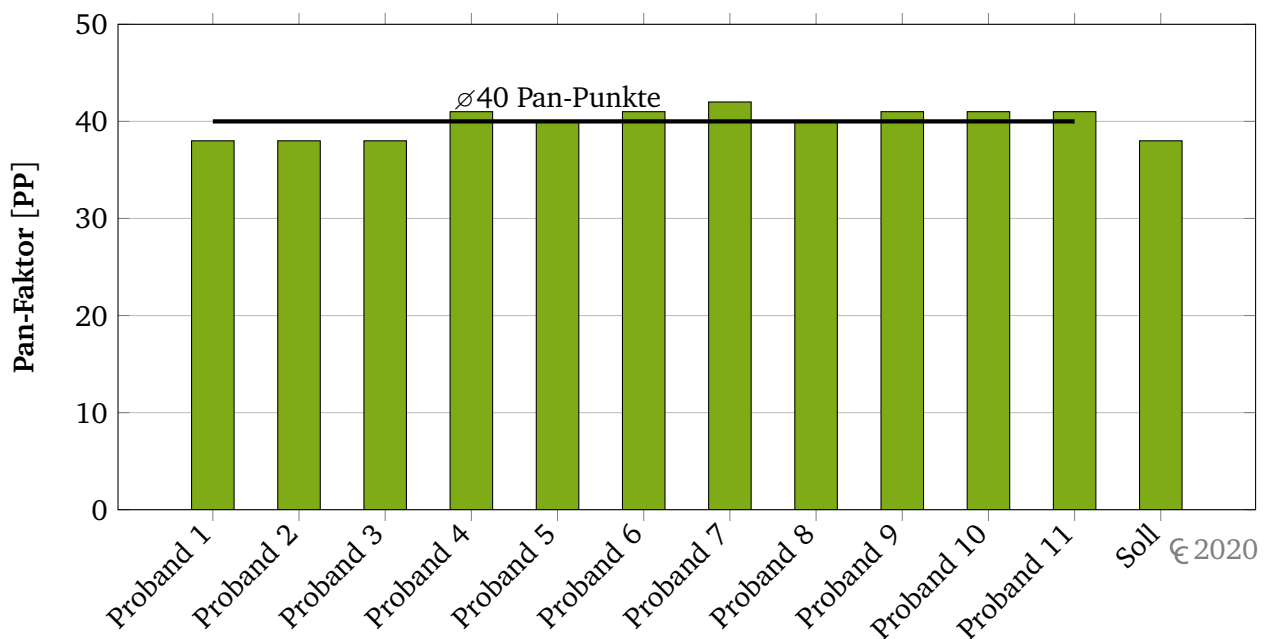


Abbildung 6-4: Ergebnisse für den Pan-Faktor durch verschiedene Probanden mit den Zahlen aus Tabelle A-15

6.2.5 Vergleich der Handlungsempfehlung und des ermittelten Pan-Faktors

Nachdem HEL.P zur Erstellung einer Handlungsempfehlung genutzt wurde, um einen Vorschlag zur Umsetzung zu erhalten und nach diesem ein Projekt erfolgreich implementiert wurde, konnte dieses mit dem Pan-Meter mit einem Pan-Faktor bewertet werden. Nun kann im Vergleich vom Soll aus der Empfehlung mit dem Ist aus dem Resultat des Pan-Meters nochmals die Aussagekraft der Handlungsempfehlung überprüft werden. Hierfür kann erneut der hierfür entwickelte Vergleichsparameter, der sogenannte Pan-Faktor, verwendet werden. In der Umsetzung wurde die Variante 2 der Handlungsempfehlung als Grundlage genutzt. Diese sagte einen Pan-Faktor von 32 bis 61 PP voraus. Bereits in Kapitel 6.2.4 wurden die Unterschiede in der Umsetzung im Bereich der auditiven und haptischen Wahrnehmung geschildert. Dennoch entspricht die Umsetzung größtenteils der Empfehlung und sollte somit in diesen Bereich eingeordnet werden können. Der Pan-Faktor von VR4Teach beträgt 38 PP und liegt damit im vorausgesagten Bereich der Handlungsempfehlung. Der Unterschied zum Maximum tritt dadurch auf, dass die Anwendung als Demonstrator primär die Funktionalitäten aufzeigt und deshalb viele Umsetzungsqualitäten in einer geringen Anzahl an Elementen umsetzt (siehe Tabelle 6-3). Deshalb macht diese Einstufung Sinn und ist im Vergleich zu anderen nur knapp unterhalb des Durchschnitts.

Dieser direkte Vergleich der Resultate von Pan-Meter und HEL.P mittels Pan-Faktor und der Verwendung eines realen Projektes zeigt, dass das Konzept und Umsetzung dieser Arbeit funktioniert. Die Softwarelösungen sind damit erfolgreich validiert und könnten zukünftig als Prototyp in einem Feldversuch verwendet werden.

Es wurde zusätzlich der Anwendungsfall 3 der Handlungsempfehlung basierend auf den hier ermittelten Pan-Faktor durchgeführt. Als Ergebnis wird ein Verbesserungsvorschlag aufgezeigt, welcher im Anhang A.4.3 einzusehen ist. Hier geht klar hervor, dass eine Verbesserung der Quantität als auch darauffol-

gend die Qualität den Pan-Faktor verbessern würde. Dieser Fall wurde nicht näher validiert aber die Funktionalität kann erneut als erfolgreich verifiziert angesehen werden.

6.3 Zusammenfassung und Fazit der Verifizierung und Validierung

Innerhalb dieses Kapitels wurde die Softwarelösungen des Pan-Meters in Form der Excel-Tabellenkalkulation sowie als Webseite wie auch HEL.P mit festgelegten Tests verifiziert und in Verwendung, Nutzung und Analyse der Ergebnisse innerhalb eines realen Projekts validiert. Zur Verifizierung wurden die einzelnen beinhalteten Funktionalitäten getestet, indem Eingaben anhand klar definierter Werte mit bekannten Ergebnissen durchgeführt wurden. Durch den Vergleich der softwareseitigen Resultate mit den bekannten Ergebnissen konnte gezeigt werden, dass die Lösungen in ihrer Umsetzung funktionieren und die richtige Ermittlung durchführen. Diese Tests wurden nicht nur in einer lokalen Version sondern ebenfalls als gebildete Applikation in einer Server-Client-Struktur durchgeführt. Die einfache Anbindung der Umsetzung in die Serverstruktur zeigt über die Tests hinaus auf, dass eine Verwertung des implementierten Systems mit wenig Aufwand möglich ist.

Anschließend wurde anhand des umgesetzten Projekts VR4Teach beide Softwarelösungen und dahinter liegende Konzepte validiert, indem die Aussagekraft, Realitätsnähe und Machbarkeit überprüft wurde. Dafür wurde mit HEL.P eine Handlungsempfehlung zur Umsetzung des Projekts anhand definierter Anforderungen und Projektziele erstellt und mittels dieser die Applikation VR4Teach implementiert. Im direkten Vergleich zur Machbarkeit und Umsetzung zeigte sich, dass das Konzept der Handlungsempfehlung funktioniert und zielführend aufgebaut ist. Durch die erfolgreiche Implementierung von VR4Teach konnte gezeigt werden, dass die Handlungsempfehlung aussagekräftig und mit richtigen Vorschlägen gefüllt ist. Abschließend wurde mit der Betrachtung der umgesetzten Applikation von VR4Teach diese im Pan-Meter mit einem Pan-Faktor bewertet. Auch dies konnte erfolgreich und fehlerfrei durchgeführt werden. Ein direkter Vergleich der Handlungsempfehlung und des anschließend ermittelten Pan-Faktor zeigte zudem, dass die Vorhersage zum Erreichbaren und Möglichen stimmt. Diese erfolgreiche Validierung bestätigt erneut die Aussagekraft beider Konzepte und Softwarelösungen.

Daneben wird der Pan-Faktor als Vergleichsparameter in seinem Konzept aber auch Anwendbarkeit geprüft und kann als erfolgreich bezeichnet werden. Das Konzept eines solchen Vergleichsparameters birgt viele Vorteile und ermöglicht den Vergleich und somit die Entwicklung der hier vorgestellten Softwarelösungen. Die Verifizierung und Validierung wurden damit erfolgreich abgeschlossen.

7 Resultat und Diskussion

„Ich bin nicht jung genug, um alles zu wissen.“ - James M. Barrie

Innerhalb dieses Kapitels soll ein Fazit zu dieser Arbeit gezogen und ausformuliert werden. Dieses Ergebnis wird anschließend mit den gewonnen Erkenntnissen diskutiert. Abschließend soll die Skala des Pan-Faktors in der zukunftsorientierten Entwicklung betrachtet und ein Blick darauf geworfen werden, ob eine Bewertung über die natürliche Realität denkbar ist.

7.1 Fazit

Zabel et al. [357] erarbeiten in ihrer Studie mit 44 Befragten, dass es für den Einsatz neuer immersiver Medien wie VR, AR & Mixed-Reality an Standards fehlt und der hohe Erklärungsbedarf verhindert, dass diese Technologien flächendeckend eingesetzt werden. Die intensive Recherche in Bezug auf die Ingenieurwissenschaften hat gezeigt, dass es erstrebenswert ist, diese Technologien zu verwenden, allerdings aktuell nur wenige Applikationen im Bereich der Ausbildung, Training, Planung, Ausführung, Wartung und Betrieb im Bau- und Umweltwesen vorhanden sind. Im Rahmen dieser Arbeit wird mit dem Pan-Faktor ein Vergleichsparameter für unterschiedlichste Anwendungen der verschiedenen Bereiche sowie Arten der Digitalen Realität vorgeschlagen. Dabei wird dieser basierend auf den zahlreichen existierenden Forschungsergebnissen im Bezug zur Analyse von Realität, Computern und Schnittstellen mit den detektierten Einflussfaktoren Immersion, Präsenz und Wechselwirkung bestimmt. Es wurde in dieser Arbeit detaillierte Definitionen zur objektiven Bewertung dieser Einflussfaktoren und somit zur Bestimmung des Faktors erstellt. Damit dies möglich war, wurden bestehende Kennwerte (Freiheitsgrade & Anwendungsbereich) untersucht und eindeutige Definitionen in Bezug auf den Menschen formuliert sowie in einer mathematischen Beschreibung ausgedrückt. Mit Verwendung dieser Kennwerte besitzt der Pan-Faktor, bestehend als Zahlenwert, die Fähigkeit Vergleiche zu erstellen und ermöglicht mit der Definition eine Aussage wie immersiv bzw. realistisch eine Applikation wahrgenommen wird. Dabei hat er die Stärke unabhängig des Anwendungsgebiets zu sein und bezieht sich auf alle Applikationen des hier entwickelten Begriffs der Digitalen Realität. Die Formulierung und Konkretisierung dieses Begriffs ermöglicht eine Einordnung in die künstliche Realität und umfasst bestehende als auch neu entstehende Medien und Technologien im Kontext der digitalen Ingenieurmethoden. Eine Einordnung dieser in der Digitalen Realität schafft ein Verständnis zu einzelnen Techniken und die Bewertung durch den Pan-Faktor hilft beim Vergleich. Man kann sagen, dass damit trotz großer Unterschiede Applikationen in der Softwarelandschaft verglichen werden können. Dieser Vergleich als Stärke angesehen, schafft einen Standard, welcher für unterschiedlichste Fragestellungen genutzt werden kann und das angesprochene Problem in der Studie von Zabel et al. [357] löst.

Dabei ist wichtig festzuhalten, dass der Pan-Faktor keine Bewertung im Sinne von gut und geeignet darstellt, sondern der Einsortierung des Levels in der natürlichen Realität dient. Ob es in bestimmten

Anwendungsbereichen sinnvoll ist bzw. das Ziel sein sollte, Lösungen zu entwickeln, welche der natürlichen Realität so nah als möglich kommen, ist außerhalb dieser Arbeit für verschiedene Fachgebiete und Fragestellung beispielsweise durch Feldversuche zu beantworten. Nichtsdestotrotz wird durch diesen Faktor ein Vergleich ermöglicht, welcher vielfältig eingesetzt werden kann. Mit dem Einsatz dieses Faktors können Forschungsergebnisse einheitlich beschreibbar formuliert bzw. die zugrundeliegende Umsetzung generalisiert erläutert werden.

Die Stärke wird in dieser Arbeit gezeigt, indem aktuelle Entwicklungen verglichen werden und damit Potentiale für Ingenieure und Ingenieurinnen in unterschiedlichen Bereichen und damit die Umsetzungsmöglichkeiten, wie auch Grenzen herausgestellt worden sind. Technologische Potentiale konnten aufgezeigt und die Grenzen der verschiedenen Systeme gezeigt werden. Dieser umfangreiche Vergleich sowie die Definition der einzelnen Einflussfaktoren konnte anschließend dazu genutzt werden, eine Handlungsempfehlung für Ingenieure und Ingenieurinnen zu konzeptionieren und umzusetzen. Dabei beschreibt die Empfehlung eine Umsetzungsmöglichkeit Projektideen zu entwickeln und kann mit geringem Aufwand erstellt werden. Auch enthält sie Feedback, eine Aussage zum geeigneten Medium und dem möglichen Pan-Faktor. Darüber hinaus können basierend auf den Analysen zu Hardware und Softwaresystemen Aussagen zu einsetzbaren Displays und zu empfehlende Umsetzungsqualitäten getroffen werden. Durch gezielte Fragen kann die Empfehlung individuell erstellt werden und passt sich den Anforderungen des Nutzenden an. Eine solche Handlungsempfehlung kann helfen, schnell und unkompliziert einen Überblick zur möglichen Umsetzung zu erhalten und die zukünftige Anwendung im Vergleich zu anderen einzusortieren. Außerdem ist eine Machbarkeitsanalyse denkbar. Dies dient dazu einen schnellen Überblick für Umsetzungen zu erhalten oder Potentiale der eigenen Projektidee zu erkennen. Zusätzlich dienen die Ergebnisse der Empfehlung der Verständigung zwischen den Projektbeteiligten, Ingenieuren, Ingenieurinnen und den Entwickelnden des Projekts. Es ist gegebenenfalls möglich diese als Eintrag in die Anforderungen der Entwicklung aufzunehmen und enthält für die Umsetzung klare Formulierungen.

Das Konzept der Handlungsempfehlung als auch des Pan-Faktors wurde in einer interaktiven Webseite als HEL.P bzw. Pan-Meter erfolgreich umgesetzt und dies mit dem Projekt VR4Teach validiert. Alle Funktionen sind in einem lokalen als auch in einer externen Server-Struktur durchführbar. Dies wurde objektiv verifiziert. Die Wahl einer Webseite ist dabei sehr geeignet, da die Informationstiefe beider Konzepte schlank und übersichtlich dargestellt werden und über dynamisch und kontextsensitive Inhalte an unterschiedliche Anforderungen angepasst werden kann. Mit Hilfe der Webseite ist eine Anbindung ans World Wide Web möglich und der flächendeckende und freie Zugang dieser Hilfsmittel umsetzbar. Damit kann sichergestellt werden, dass diese eingesetzt und zukünftige Entwicklungen und Forschungsergebnisse mit der Beschreibung des jeweiligen Faktors ergänzt werden können. Dadurch, dass die Implementierung bereits auf einem Server vorhanden ist, kann durch die Verknüpfung mit einer Domäne, diese bereits jetzt für den öffentlichen Zugriff freigeschaltet werden. Eine externe und freie Nutzung ist damit gegeben.

Es lässt sich festhalten, dass die Entwicklung des Pan-Faktors und der daraus basierenden Handlungsempfehlung in Form von HEL.P erfolgreich waren und diese zur einfacheren Entwicklung von digitalen Ingenieurmethoden eingesetzt werden können. Darüber hinaus ermöglichen sie zukünftig die Reduktion

des Erklärungsbedarfs und können damit zum flächendeckenden Einsatz der immersiven Technologien beitragen.

7.2 Diskussion der Ergebnisse

Es gilt im Folgenden die Ergebnisse dieser Arbeit basierend auf dem vorherigen Fazit zu diskutieren. Die Ergebnisse dieser Arbeit sind teilweise in den Bereich der Grundlagenforschung einzuordnen und schaffen mit dem Vergleichsparameter, genannt Pan-Faktor, eine auf Zahlen basierte Aussage für Anwendungen der digitalen Ingenieurmethoden. Dabei muss klar beachtet werden, dass dieser Faktor nicht vollumfänglich ist. Eine wesentliche Annahme wurde getroffen, um die subjektive Affinität und Reizverarbeitung, sowie Akzeptanz eines Präsenzgefühls zu vereinfachen. Im Bereich der Ingenieur Anwendungen wird von einem emotionslosen Kontext gesprochen, welcher die Präsenz deutlich näher an die Immersion bindet. Ebenfalls ist die Akzeptanz des Ingenieurs und der Ingenieurin für eine Ingenieur Anwendung als gegeben vorausgesetzt worden. Dies ist nicht immer der Fall und so kann der Pan-Faktor die Präsenzforschung und zahlreichen Einflüsse sowie Störungseffekte innerhalb verschiedener Anwendungen nicht kompensieren. Es findet demnach eine Vereinfachung bei der Betrachtung der Präsenzforschung statt. Dies ist möglich, da in einem generellen Nutzen von einer hohen Affinität durch Ingenieure und Ingenieurinnen auszugehen ist. Außerdem wäre ein solcher subjektiver Anteil sehr individuell und ist damit sehr schwer messbar bzw. wiederholbar. Eine Abstraktion der Präsenzforschung ist deshalb erforderlich und verringert nicht die Möglichkeiten und hohen Nutzen eines vergleichenden Parameters, den der Pan-Faktor darstellt.

Mit Hilfe des Pan-Faktors können erstmals Anwendungen miteinander verglichen werden und Forschungen auf einem aussagekräftigen Parameter aufbauen und es wäre empfehlenswert diesen standardmäßig in der Beschreibung zur Umsetzung mit aufzuführen. Am besten wären hier die vier Zahlen des Pan-Faktors, der Immersion, Präsenz und Wechselwirkung zu nennen. Damit können anderer Wissenschaftler die Anwendung und Ergebnisse gezielter und einfacher in einen weiteren Kontext einordnen. Außerdem werden Resultate basierend auf alten Entwicklungen und die dadurch entstehende Fehleranfälligkeit in einem zukünftigen Kontext klarer. Wissenschaftler können somit sehen, ob es sich bei den Ergebnissen, um Angaben handeln, die veraltet sind.

Trotz dieser Vergleichbarkeit muss die klare Aussage getroffen werden, dass der Pan-Faktor nicht bewerten kann, ob eine Anwendung sinnvoll und gut ist. Auch ist es nicht immer erstrebenswert einen möglichst hohen Pan-Faktor zu erhalten. Unter Umständen kann es sinnvoll sein, nur einen bestimmten Bereich der Skala abzudecken. Es ist deshalb wichtig, gezielt für verschiedene Kategorien, Anwendungsfälle oder Problemstellungen im Ingenieurkontext Untersuchungen durchzuführen, die Aufschluss darauf geben, welche Bereiche des Bewertungsskala zielführend sind.

Es ist trotz kritischer Betrachtung festzuhalten, dass mit den Ergebnissen dieser Arbeit grundlegende Definitionen im Bereich der digitalen Ingenieurmethoden getroffen worden sind. Über die Vergleichbarkeit und ausführliche Analyse von Hard- und Software sind Potentiale hervorgehoben und mit dem Werkzeug der Handlungsempfehlung diese direkt verständlich aufbereitet worden. Der Pan-Faktor kann im Kontext der Forschung aber auch der kommerziellen Entwicklung eine neue Grundlage schaffen, um einheitliche Bewertungen zu liefern, die beispielsweise als Qualitätssiegel genutzt werden können.

7.3 Diskussion zu den Grenzen der Digitalen Realität

Die Analyse zahlreicher Hardwaresysteme bzw. Displayarten, die Betrachtung verschiedener Medienarten und die Auseinandersetzung mit der natürlichen und künstlichen Realität haben zu dem erweiterten Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum in Abbildung 3-2 geführt. Dabei stellte sich zunehmend die Frage, ob es für die Digitale Realität möglich ist, die natürliche Realität zu übertreffen und über diese Festlegung hinaus Werte von über 100 PP zu erreichen. Aktuell ist die künstliche Realität der natürlichen unterlegen, doch spielt in dieser Zeit und Ort durch z. B. das World Wide Web keine Rolle mehr. Außerdem können Welten, Situationen und Szenarien in der virtuellen Umgebung geschaffen werden, die in einer natürlichen Realität nicht denkbar sind, z. B. fliegen. Wäre es demnach denkbar alle vorliegende Hardware zu verwenden, um in einer softwaretechnisch maximierten virtuellen Umgebung mehr als das natürlich reale frei von physikalischen Gesetzen interagieren und leben zu können?

Diese Fragestellung kann durch diese Arbeit teilweise beantwortet und in einer persönlichen Meinung die Zukunftsperspektive aufgezeigt werden. Für die Umsetzung einer künstlichen Realität mit einem Pan-Faktor bis und über 100 PP sind Hardwarekomponenten verschiedener Displayarten aber auch Modelle für die Software nötig. Genau diese beiden Abhängigkeiten verhindert die Steigerung der künstlichen Realität zur Überschreitung der Natürlichen. Es ist zwar in einzelnen Bereichen möglich in der virtuellen Umgebung mehr zu können als in der natürlichen Realität wie beispielsweise das Erleben von Situationen an einem anderen Ort durch VR und die Nutzung geänderter physikalischer Gesetze. Allerdings ist ein Gesamtanwendung über das natürlich Reale hinaus heutzutage nicht möglich und wird wohl auch zukünftig nicht möglich sein. Dies liegt daran, dass, wie die Analyse der Displays zeigt, kein Display und auch keine Kombination verschiedener die Freiheitsgrade und den Anwendungsbereich des Menschen in der natürlichen Realität wiedergeben und bespielen kann. Jedes System schränkt Freiheitsgrade ein, wodurch zwar einige Funktionalitäten geschaffen werden, andere aber entfallen. So z. B. bei den Bewegungsplattformen, die das Laufen im unendlichen Raum ermöglichen und somit den Anwendungsbereich steigern, aber gleichzeitig durch Befestigungen u.ä. die Freiheitsgrade in anderen Bereichen z. B. Armbewegungen einschränken. Genauso zeigte die Analyse die großen Unterschiede der technischen Möglichkeiten zur Reizung der menschlichen Wahrnehmung in Bezug auf die natürliche Realität z. B. die Möglichkeiten zur Simulation von Lichtverhältnissen. Es ist davon auszugehen, dass auch zukünftig kein Hardwaresystem diese Problematik lösen kann und alle Diskrepanzen beseitigt werden können und somit die Freiheitsgrade und der Anwendungsbereich der künstlichen Realität immer der natürlichen unterliegen. Anders wäre dies, wenn man nicht den Körper mit Reizen bespielt, sondern die Reizverarbeitung im Gehirn direkt mit Signalen ansprechen würde. Durch elektronische Reizung an den richtigen Stellen im Gehirn, wäre es denkbar, dem Menschen das Gefühl zu geben, dass dieser etwas in einer künstlichen Realität als Wirklichkeit erlebt. Aktuell ist unser Wissen über die Verarbeitung im menschlichen Nervensystem und die Reizung der richtigen Stellen mit der geeigneten Form viel zu gering, als das dies als Möglichkeit in Betracht gezogen werden kann.

Der zweite limitierende Faktor ist das Modell der virtuellen Umgebung an sich. Jede virtuelle Umgebung besteht aus einem Modell und wie die Definition bereits aussagt, handelt es sich bei einem Modell um die Abstraktion der Realität. Sprich jedes Modell ist ein Abbild eines Szenarios, einer Funktion oder eines Zustandes, welches durch Annahmen, Restriktionen und Vereinfachungen der natürlichen Realität

gebildet wird. Dabei entspricht es niemals der natürlichen Realität und kann folglich auch nicht übertroffen werden. Selbst bei Erreichen eines Modells in der Qualität der natürlichen Realität, existiert die mangelnde Rechenleistung als Hindernisgrund. Um komplexere Modelle in einem der beschriebenen Medien vollumfänglich performant laufen zu lassen ist, die Rechenleistung zum jetzigen Zeitpunkt nicht ausreichend. Dies wird wohl noch längere Zeit eine Herausforderung darstellen, aber es ist davon auszugehen, dass dies in Zukunft möglich sein wird. Dennoch ist die Komplexität der Modellbildung und das mangelnde Wissen über einzelne Details der natürlichen Realität so groß, dass davon auszugehen ist, dass eine Steigerung des Pan-Faktors über 100 PP nicht möglich sein wird. Die künstliche Realität wird die natürliche nicht übertreffen. Dennoch ist der Pan-Faktor so konzeptioniert worden, um gegeben falls einen höheren Wert annehmen zu können.



8 Zusammenfassung und Ausblick

„Wir warten das ganze Leben lang - Auf was?“

Die Kunst ist es die Zeit des Wartens gut zu füllen.“ - Bärbel Eller [89]

8.1 Zusammenfassung der Arbeit

In dieser Arbeit wurden die Grundlagen zur künstlichen Reizung der menschlichen Wahrnehmung zusammengestellt und mit der Analyse von 258 Displaytypen die Diskrepanz zwischen natürlicher und künstlicher Realität herausgearbeitet. Daneben wurden weitere Kriterien für die natürliche Interaktion aber auch das Gefühl etwas wahrhaftig erlebt zu haben bzw. präsent zu sein betrachtet und Synergien zwischen den einzelnen Komponenten aufgezeigt. Anschließend wurden Technologien und Medien wie AR, Erweiterte Virtualität, VR, 360°-Video & -Foto, 3D und 2D in einem gemeinsamen Kontext, hier bezeichnet als Digitale Realität, einsortiert und basierend auf den Forschungsergebnissen von Milgram et al. [209] ein erweitertes Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum erstellt. Dieses stellt die einzelnen Technologien auf einer Skala von Abstraktion bis zur natürlichen Realität dar und hilft bei der klaren Abgrenzung voneinander. Diese umfangreiche Analyse und Differenzierung ermöglicht die Konzeptionierung eines Vergleichsparameters für Ingenieur Anwendungen innerhalb der Digitalen Realität. Dieser wurde als Pan-Faktor basierend auf Immersion, Präsenz und Wechselwirkung mathematisch formuliert. Für jeden einzelnen Einflussfaktor sind Möglichkeiten zur Bezifferung abhängig der Kennwerte der Freiheitsgrade und des Anwendungsbereichs geschaffen worden. Dabei wird die Immersion als Reizung der menschlichen Wahrnehmung in allen Sinnesarten in ihrer Qualität und eingesetzten Quantität bewertet. Die Präsenz wird mittels des Körpergefühls und der Form der Bewegung bewertet und die Wechselwirkung weist die Interaktion mit dem Computer und die Kommunikation mit anderen Beteiligten auf. Hiermit wird eine Lösung präsentiert, welche die Abstraktion bzw. das Level der natürlichen Realität einer Ingenieur Anwendung beziffern kann. Die mathematische Beschreibung dieser Komplexität ermöglicht den Vergleich von unterschiedlichen Applikationen verschiedener Bereiche und die leichtere Differenzierung von Unterschieden bzw. Potentialen.

Als Pan-Meter wurde die mathematische Beschreibung des Pan-Faktors gekoppelt an die erstellten Definitionen als Softwarelösung in Form einer Excel-Tabellenkalkulation als auch einer interaktiven und kontextsensitiven Webseite umgesetzt. Das Pan-Meter dient dazu, mit wenigen Eingaben des Nutzens den Pan-Faktor einer jeden digitalen Ingenieur Anwendung ermitteln zu können. Dabei werden die einzelnen Qualitäten und Quantitäten aller Bestandteile der Einflussfaktoren abgefragt und die Werte für Immersion, Präsenz, Wechselwirkung wie auch der Pan-Faktor berechnet. Mit Hilfe dieses Werkzeugs wurden anschließend 102 Ingenieur Anwendungen aus den Bereichen der Ausbildung, Training, Planung, Ausführung und Betrieb im Bau- und Umweltwesen bewertet und miteinander verglichen. Damit konnten primär eingesetzte Medien in den unterschiedlichen Kategorien festgestellt und jeweilige Potentiale identifiziert werden. Dieser Vergleich wurde dem Pan-Meter hinzugefügt, um direkt bei der Ermittlung

des Pan-Faktors eine Übersicht über die Abweichung zu anderen Anwendungen zu erhalten. Mit dieser Vergleichsanalyse und dem Pan-Faktor wurde in Bezug auf die digitalen Ingenieurmethoden eine Handlungsempfehlung konzeptioniert, welche eine Aussage zum geeigneten Medium bzw. Technologie, als auch den einzusetzenden Displayarten und Umsetzungsqualitäten trifft. Dabei werden für jeden Einflussfaktor des Pan-Faktors Aussagen und Vorschläge zur geeigneten Reizung gegeben und kurz erklärt. Außerdem wird der mögliche Pan-Faktor, der daraus entstehenden Entwicklung, prognostiziert und mit den Existierenden verglichen, um bereits vor der Entwicklung Unterschiede zu erkennen und Potentiale zu nutzen. Die Handlungsempfehlung richtet sich dabei an Ingenieure und Ingenieurinnen, die digitale Ingenieurmethoden innerhalb der Digitalen Realität entwickeln möchten, oder eine bestehende Applikation verbessern wollen. Für beide Fälle sieht das Konzept eine Empfehlung mit mindestens zwei und maximal drei Lösungsvarianten vor. Das Konzept für eine Handlungsempfehlung mittels Pan-Faktor wurde in einer weiteren Software, namens HEL.P, als interaktive Webseite implementiert. Dabei wurde, wie auch beim Pan-Meter, die Möglichkeiten zur kontextsensitiven Inhaltsbildung von Webseiten genutzt, um die komplexen Inhalte ansprechend, übersichtlich und für den Nutzenden einfach aufzubereiten und dabei eine notwendige Informationstiefe zu gewährleisten.

Am Ende dieser Arbeit wurden beide Konzepte und Umsetzungen verifiziert und validiert. Hierfür wurden die Funktionalitäten beider Softwarelösungen darüber getestet, ob bei einer definierten Eingabe auch die vorher definierte Ausgabe entsteht. Dies wurde in einem lokalen System als auch in einem Netzwerk mit Server-Client-Struktur mit verschiedenen Geräten durchgeführt. Anschließend ist durch die Betreuung und Entwicklung eines realen Projekts, namens VR4Teach, die Handlungsempfehlung als auch die Klassifizierung durch den Pan-Faktor validiert worden. Dies geschah indem anhand definierter Projektziele die Handlungsempfehlung durchgeführt und mit den Resultaten die Umsetzung implementiert wurde. Der Vergleich mit anderen Anwendungen hat geholfen, um die Potentiale zu erkennen und direkt bei der Umsetzung mit einfließen zu lassen. Dies ermöglichte die Vermeidung von zusätzlichen Iterationsschritten in der Entwicklung. Durch die Implementierung mit dem Resultat eines funktionsfähigen Demonstrators konnte gezeigt werden, dass die Empfehlung für das Projekt zielführend und die Umsetzungsvorschläge umsetzbar und realistisch sind. Anschließend konnte gezeigt werden, dass der Pan-Faktor der Vorhersage der tatsächlichen Anwendung entspricht. Mit diesem Projekt konnte die Stärke und die Richtigkeit des Pan-Faktors als auch der Handlungsempfehlung nachgewiesen werden. Der Pan-Faktor ist demnach für Ingenieure und Ingenieurinnen einsetzbar, um Anwendungen, Forschungen innerhalb der Digitalen Realität zu beziffern und damit vergleichbar zu gestalten.

8.2 Ausblick zum Einsatz der entwickelten Konzepte

In einer auf dieser Arbeit folgende Nutzung kann der Pan-Faktor verwendet werden, um in wissenschaftlichen Untersuchungen die Bedingungen und Anwendungen einheitlich zu beschreiben. Damit kann der Vergleich vereinfacht und Forschungsergebnisse auch langfristig genutzt werden. In den Grundlagen wurde beispielsweise die Problematik zur Erforschung der Cybersickness mit unterschiedlichen Display-Systemen (Head-Mounted-Display vs. World-Fixed-Display) erläutert. Hier stützten sich viele Aussagen auf veralteten Displayarten oder Umsetzungen der Fortbewegung, die aktuell nicht mehr eingesetzt werden und somit die Ergebnisse in Frage zu stellen sind. Mit dem Pan-Faktor in den Erläuterungen und Beschreibung der Ergebnisse könnte durch einen Zahlenwert der Grad der natürlichen Realität ange-

geben werden. Es ist dadurch leichter und schneller möglich, zu sehen, welche Aussagerelevanz die Ergebnisse in einer zukünftigen Betrachtung hat. Ist der Pan-Faktor weit unter den zu der Zeit herrschenden Durchschnittswerten, sind die Ergebnisse durch die stetige Entwicklung von Computer-, Hard- und Softwaresystemen in Frage zu stellen und gegebenenfalls erneut in einem aktuelleren Kontext durchzuführen. Die Langlebigkeit und Aussagekraft von Forschungsergebnissen werden mit diesem Faktor verlängert.

Es wäre von großem Interesse auch weiterhin Anwendung zu bewerten und in die Vergleichsmatrix aufzunehmen, um diese stetig aktuell und aussagekräftig zur Verfügung zu stellen. Die stetige Analyse von Anwendungen kann ebenfalls in die Datenmenge der hier begonnen 102 Applikationen aufgenommen und somit zukünftig beständig präziser werden. Neben diesen Anwendungen ist es denkbar die verwendeten 258 Hardwarekomponenten in HEL.P zu ergänzen und stetig zu erweitern. Neben der Kategorie welches Display für welchen Einflussfaktor geeignet ist, könnten damit gezielt Produkte beworben bzw. empfohlen werden. Es ist darüber hinaus zu erforschen für welche Bereiche der digitalen Ingenieurmethoden, welche Pan-Faktoren geeignet und damit sinnvoll sind. Trifft der Faktor keine Aussage darüber, ob es erstrebenswert ist stetig nach einem besseren Pan-Faktor und maximalen Wert zu streben, wäre es sinnvoll Bereiche für unterschiedliche Kategorien der digitalen Ingenieurmethoden oder Anwendungsfälle zu definieren. Hierfür könnten Untersuchungen angestrebt werden, die als Ergebnis Zielwerte liefern. Mit einer solchen Analyse könnte die Handlungsempfehlung weiter verfeinert und noch gezieltere Aussagen getroffen werden.

Durch die fortgeschrittene Implementierung beider Konzepte und der erfolgreichen Einbindung in einer Serverstruktur könnte diese zukünftig im World Wide Web für alle Ingenieure und Ingenieurinnen zur Verfügung gestellt werden. Die Berechnung des Pan-Faktors könnte so für alle öffentlich verfügbar gemacht werden, um in der breiten Masse wirken zu können. Durch eine große Nutzung steigt der Effekt der Vergleichbarkeit und gewinnt dieser Fakt an mehr Gewichtung. Der Pan-Faktor kann darüber hinaus auch den Bestrebungen des Dive Into Virtual Reality e.V.¹ zur Entwicklung eines Qualitätssiegels als Grundlage dienen. Es ist somit ein vielseitiger und großräumiger Einsatz der hier gewonnen Erkenntnisse möglich. Diese tragen dazu bei, dass das Verständnis für die neuen Technologien gesteigert wird und der Einsatz leichter umgesetzt werden kann.

¹ <https://www.divr.de/> Aufgerufen am 31.01.2020.



Abkürzungsverzeichnis

2D	Zweidimensionalität
3D	Dreidimensionalität
AR	Augmented Reality
API	Application Programming Interface
AV	Erweiterte Virtualität
BIM	Building Information Model
BIM	Building Information Modeling
BMD	Body-Mounted-Display
BPMN	Business Process Modelling Notation
CAD	Computer Aided Drawing/Design
CAVE	Cave Automatic Virtual Environment
CIE	Commission Internationale d'Eclairage
CSV	Comma Separated Values
Dev	Development
DOF	Freiheitsgrade
DR	Digitale Realität
FOR	Anwendungsbereich
FOV	Sichtfeld
GIS	Geoinformationssystem
GUI	Graphical User Interface
HCI	Human-Computer Interaction
HD	High Definition
HEL.P	Handlungsempfehlung mittels Pan-Faktor
HMD	Head-Mounted-Display

HHD	Hand-Held-Display
HTML	Hypertext Markup Language
IIB	Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen
IFC	Industry Foundation Classes
IMU	Inertial Measure Unit
JSON	JavaScript Object Notation
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Licht-Emittierende Diode
LOD	Level of Detail
MR	Mixed-Reality
n.a.	nicht angegeben
OBD	On-Body-Display
OLED	organisch Licht-Emittierende Diode
PP	Pan-Punkte
PDF	Portable Document Format
QR	Quick Response
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
UML	Unified Modeling Language
WFD	World-Fixed-Display
VIO	Visual Odometry
VR	Virtuelle Realität
XR	X-Reality

Literatur

- [3] W. A. Abdelhameed, “Creativity and VR use”, S. 10, 2014. Adresse: http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/caadria2014_056 (besucht am 24.03.2019).
- [4] R. Abdellatif, *Distance Learning in SecondLife: A Virtual Crit.* 2008. Adresse: <https://t1p.de/qkxh> (besucht am 14.04.2019).
- [5] A.-H. G. Abulrub, A. Attridge und M. A. Williams, “Virtual Reality in Engineering Education: The Future of Creative Learning”, *International Journal of Emerging Technologies in Learning (IJET)*, Jg. 6, Nr. 4, 2. Dez. 2011, ISSN: 1863-0383. DOI: 10.3991/ijet.v6i4.1766. Adresse: <http://online-journals.org/i-jet/article/view/1766> (besucht am 28.10.2019).
- [8] J. Amores und P. Maes, “Essence: Olfactory Interfaces for Unconscious Influence of Mood and Cognitive Performance”, in *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '17*, Denver, Colorado, USA: ACM Press, 2017, S. 28–34, ISBN: 978-1-4503-4655-9. DOI: 10.1145/3025453.3026004. Adresse: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=3025453.3026004> (besucht am 30.08.2019).
- [9] J. Amores, R. Richer, N. Zhao, P. Maes und B. M. Eskofier, “Promoting relaxation using virtual reality, olfactory interfaces and wearable EEG”, in *2018 IEEE 15th International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN)*, Las Vegas, NV, USA: IEEE, März 2018, S. 98–101, ISBN: 978-1-5386-1109-8. DOI: 10.1109/BSN.2018.8329668. Adresse: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8329668/> (besucht am 27.06.2019).
- [10] P. B. Andersen und L. Qvortrup, *Virtual Applications: Applications with Virtual Inhabited 3D Worlds*. Springer Science & Business Media, 20. Jan. 2004, 280 S., ISBN: 978-1-85233-658-5.
- [18] R. Baños, C. Botella, M. Alcañiz, V. Liaño, B. Guerrero und B. Rey, “Immersion and Emotion: Their Impact on the Sense of Presence”, *CyberPsychology & Behavior*, Jg. 7, Nr. 6, S. 734–741, 1. Dez. 2004, ISSN: 1094-9313. DOI: 10.1089/cpb.2004.7.734. Adresse: <https://www.liebertpub.com/doi/10.1089/cpb.2004.7.734> (besucht am 09.09.2019).
- [19] J. M. Barrie, *Peter and Wendy*. London: Hodder & Stoughton, 1911, 220 S., ISBN: 978-1-5283-4911-6.
- [21] K. Beneke, *Biographien und wissenschaftliche Lebensläufe von Kolloidwissenschaftlern*, Ser. Beiträge zur Geschichte der Kolloidwissenschaften 8. Nehnten: Knof, 1999, 355 S., OCLC: 833611860, ISBN: 978-3-934413-01-6.
- [23] H. Berkner. (2019). Die Geschichte Des Computers - Website-Go, Adresse: <http://www.website-go.com/artikel/geschichte.php> (besucht am 07.08.2019).
- [28] Bibliographisches Insitut GmbH. (2019). Duden | Immersion | Rechtschreibung, Bedeutung, Definition, Herkunft, Adresse: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Immersion> (besucht am 08.05.2019).

-
- [29] T. Bittner, C. Eller, M. Dombois und U. Rüppel, "BIM-unterstützte Erstellung interaktiver, immersiver VR-Szenarien am Beispiel der Brandbekämpfung", *Bauphysik*, Jg. 40, Nr. 6, S. 410–415, Dez. 2018, ISSN: 01715445. DOI: 10.1002/bapi.201800028. Adresse: <http://doi.wiley.com/10.1002/bapi.201800028> (besucht am 08.05.2019).
- [30] D. Blume. (2011). Gerade auf LeMO gesehen: LeMO Rückblick, Adresse: <https://www.dhm.de/lemo/rueckblick/oktober-1861-die-erfindung-des-telefons.html> (besucht am 07.08.2019).
- [33] T. Bolzen. (2016). Filmgeschichte, Adresse: <https://www.film-lexikon.de/Filmgeschichte> (besucht am 07.08.2019).
- [34] P. D. I. H. Bösche. (28. Okt. 2013). Das menschliche Auge, Adresse: [https://wiki.fh-muenster.de/fb3/boesche/doku.php?id=public:mt_auge&s\[\]=auge](https://wiki.fh-muenster.de/fb3/boesche/doku.php?id=public:mt_auge&s[]=auge) (besucht am 12.08.2019).
- [37] S. Bouchard, G. Robillard, P. Renaud und F. Bernier, "Exploring new dimensions in the assessment of virtual reality induced side effects", S. 7, 2011. Adresse: https://www.researchgate.net/publication/281041352_Exploring_new_dimensions_in_the_assessment_of_virtual_reality_induced_side_effects (besucht am 07.05.2019).
- [39] D. A. Bowman und R. P. McMahan, "Virtual Reality: How Much Immersion Is Enough?", *Computer*, Jg. 40, Nr. 7, S. 36–43, Juli 2007, ISSN: 0018-9162. DOI: 10.1109/MC.2007.257. Adresse: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4287241/> (besucht am 08.05.2019).
- [42] L. E. Brown, D. A. Rosenbaum und R. L. Sainburg, "Limb Position Drift: Implications for Control of Posture and Movement", *Journal of Neurophysiology*, Jg. 90, Nr. 5, S. 3105–3118, Nov. 2003, ISSN: 0022-3077, 1522-1598. DOI: 10.1152/jn.00013.2003. Adresse: <https://www.physiology.org/doi/10.1152/jn.00013.2003> (besucht am 16.10.2019).
- [44] buildingSMART e.V. (2019). Industry Foundation Classes (IFC), Adresse: <https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/industry-foundation-classes/> (besucht am 21.11.2019).
- [45] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Hrsg., *Stufenplan Digitales Planen und Bauen Einführung moderner, IT-gestützter Prozesse und Technologien bei Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken*, unter Mitarb. von Dipl.-Ing. Helmut Bramann und Dr. Ilka May, Dez. 2015. Adresse: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/stufenplan-digitales-bauen.pdf?__blob=publicationFile (besucht am 21.11.2019).
- [46] G. C. Burdea, "Teaching Virtual Reality: Why and How?", *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Jg. 13, Nr. 4, S. 463–483, 1. Aug. 2004, ISSN: 1054-7460. DOI: 10.1162/1054746041944812. Adresse: <https://doi.org/10.1162/1054746041944812> (besucht am 10.09.2019).
- [47] G. C. Burdea. (6. Feb. 2008). World-Wide Survey of Universities Teaching Virtual Reality, Adresse: <http://vrtechnology.org/resources/public/survey.html> (besucht am 12.11.2019).

-
- [48] E. Burns, S. Razzaque, A. T. Panter, M. C. Whitton, M. R. McCallus und F. P. Brooks, "The Hand Is Slower than the Eye: A Quantitative Exploration of Visual Dominance over Proprioception", in *IEEE Proceedings. VR 2005. Virtual Reality, 2005.*, März 2005, S. 3–10. DOI: 10.1109/VR.2005.1492747.
- [49] F. Buttussi und L. Chittaro, "Effects of Different Types of Virtual Reality Display on Presence and Learning in a Safety Training Scenario", *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Jg. 24, Nr. 2, S. 1063–1076, Feb. 2017, ISSN: 1077-2626. DOI: 10.1109/TVCG.2017.2653117.
- [50] Y. Cai, v. W. van Joolingen und Z. Walker, *Vr, Simulations and Serious Games for Education*. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2018, ISBN: 9789811328435.
- [52] A. Chalmers und A. Ferko, "Levels of realism: From virtual reality to real virtuality", in *Proceedings of the 24th Spring Conference on Computer Graphics - SCCG '08*, Budmerice, Slovakia: ACM Press, 2010, S. 19, ISBN: 978-1-60558-957-2. DOI: 10.1145/1921264.1921272. Adresse: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1921264.1921272> (besucht am 11.07.2019).
- [53] A. Chalmers, D. Howard und C. Moir, "Real virtuality: A step change from virtual reality", in *Proceedings of the 2009 Spring Conference on Computer Graphics - SCCG '09*, Budmerice, Slovakia: ACM Press, 2009, S. 9, ISBN: 978-1-4503-0769-7. DOI: 10.1145/1980462.1980466. Adresse: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1980462.1980466> (besucht am 08.07.2019).
- [54] Y.-S. Chen, "Olfactory Display: Development and Application in Virtual Reality Therapy", in *16th International Conference on Artificial Reality and Telexistence-Workshops (ICAT'06)*, Nov. 2006, S. 580–584. DOI: 10.1109/ICAT.2006.95.
- [56] A. D. Cheok und K. Karunanayaka, *Virtual Taste and Smell Technologies for Multisensory Internet and Virtual Reality*, Ser. Human-Computer Interaction Series. Cham: Springer International Publishing, 2018, ISBN: 978-3-319-73863-5. DOI: 10.1007/978-3-319-73864-2. Adresse: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-73864-2> (besucht am 27.06.2019).
- [67] A. B. Craig, W. R. Sherman und J. D. Will, *Developing Virtual Reality Applications: Foundations of Effective Design*. Burlington, MA : Oxford: Morgan Kaufmann, 2009, 382 S., ISBN: 978-0-08-095908-5.
- [68] C. Cruz-Neira, D. J. Sandin, T. A. DeFanti, R. V. Kenyon und J. C. Hart. (1. Juni 1992). The CAVE: Audio visual experience automatic virtual environment, Adresse: <https://link.galegroup.com/apps/doc/A12353475/AONE?sid=lms> (besucht am 10.09.2019).
- [74] S. Davis, K. Nesbitt und E. Nalivaiko, "Comparing the onset of cybersickness using the Oculus Rift and two virtual roller coasters", Jg. 167, S. 12, 2015. Adresse: <https://crpit.scem.westernsydney.edu.au/confpapers/CRPITV167Davis.pdf> (besucht am 14.04.2019).
- [75] A. G. de Sa und G. Zachmann, "Virtual reality as a tool for verification of assembly and maintenance processes", S. 15, 1999. Adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0097849399000473> (besucht am 14.04.2019).
- [77] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., "DIN ISO 226:2006-04 Akustik - Normalkurven gleicher Lautstärkepegel (ISO 226:2003)", Apr. 2006. DOI: <https://dx.doi.org/10.31030/9671460>.

-
- [78] H. Q. Dinh, N. Walker, L. F. Hodges, Chang Song und A. Kobayashi, "Evaluating the Importance of Multi-Sensory Input on Memory and the Sense of Presence in Virtual Environments", in *Proceedings IEEE Virtual Reality (Cat. No. 99CB36316)*, März 1999, S. 222–228. DOI: 10.1109/VR.1999.756955.
- [82] Dolby. (2019). Dolby Atmos, Adresse: [/us/en/brands/dolby-atmos.html](#) (besucht am 07.08.2019).
- [83] R. Dörner, S. Göbel, W. Effelsberg und J. Wiemeyer, *Foundations, Concepts and Practice*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2016, ISBN: 978-3-319-40611-4.
- [84] H.-L. Duh, J. Lin, R. Kenyon, D. Parker und T. Furness, "Effects of field of view on balance in an immersive environment", in *Proceedings IEEE Virtual Reality 2001*, Yokohama, Japan: IEEE Comput. Soc, 2001, S. 235–240, ISBN: 978-0-7695-0948-8. DOI: 10.1109/VR.2001.913791. Adresse: <http://ieeexplore.ieee.org/document/913791/> (besucht am 16.10.2019).
- [86] D. Egan, C. Keighrey, J. Barrett, Y. Qiao, S. Brennan, C. Timmerer und N. Murray, "Subjective Evaluation of an Olfaction Enhanced Immersive Virtual Reality Environment", in *Proceedings of the 2nd International Workshop on Multimedia Alternate Realities - AltMM '17*, Mountain View, California, USA: ACM Press, 2017, S. 15–18, ISBN: 978-1-4503-5507-0. DOI: 10.1145/3132361.3132363. Adresse: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=3132361.3132363> (besucht am 27.06.2019).
- [89] C. Eller, *Die 4 Uhr Woche*, 1. Aufl. Twentysix, 30. Nov. 2016, 592 S., ISBN: 978-3-7407-1169-6.
- [91] C. Eller, "VR4Teach - Low-cost VR-Plattform zur Visualisierung von komplexen Lehrinhalten", 1. Feb. 2019.
- [92] C. Eller, T. Bittner, M. Dombois und U. Rüppel, "Collaborative Immersive Planning and Training Scenarios in VR", in *Advanced Computing Strategies for Engineering*, I. F. C. Smith und B. Dömer, Hrsg., Bd. 10863, Cham: Springer International Publishing, 2018, S. 164–185, ISBN: 978-3-319-91635-4. DOI: 10.1007/978-3-319-91635-4_9. Adresse: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-91635-4_9 (besucht am 08.05.2019).
- [93] C. Eller und S. Zhang, "Kostengünstige VR-Plattform zur Visualisierung und Begehung von komplexen 3D-Modellen", in *30. Forum Bauinformatik*, M. Steiner, M. Theiler und M. Mirboland, Hrsg., Weimar Deutschland, 20. Sep. 2018, S. 331–338, ISBN: 978-3-00-060726-4. Adresse: <https://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/107313/> (besucht am 12.10.2018).
- [97] R. Esser, D. L. Oppermann und T. Lutter, "Head Mounted Displays in Deutschen Unternehmen- Ein Virtual, Augmented Und Mixed Reality Check", 2016, Mai 2016.
- [100] EyeSpy360. (30. Apr. 2014). Die Geschichte der 360 Fotografie, Adresse: <https://www.eyespy360.com/de-de/> (besucht am 07.08.2019).
- [106] S. L. Farra, E. T. Miller und E. Hodgson, "Virtual reality disaster training: Translation to practice", *Nurse Education in Practice*, Jg. 15, Nr. 1, S. 53–57, Jan. 2015, ISSN: 14715953. DOI: 10.1016/j.nepr.2013.08.017. Adresse: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1471595313001765> (besucht am 08.05.2019).

-
- [111] A. S. Fernandes und S. K. Feiner, “Combating VR Sickness through Subtle Dynamic Field-of-View Modification”, in *2016 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, März 2016, S. 201–210. DOI: 10.1109/3DUI.2016.7460053.
- [114] B. I. GmbH. (2019). Duden | Anwendung | Rechtschreibung, Bedeutung, Definition, Herkunft, Adresse: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Anwendung> (besucht am 18.06.2019).
- [119] Google. (14. Nov. 2019). Google Trends, Adresse: <https://trends.google.de/trends/explore?date=all&q=virtual%20reality,mixed%20reality,augmented%20reality> (besucht am 14.11.2019).
- [121] A. Grabowski und J. Jankowski, “Virtual Reality-based pilot training for underground coal miners”, *Safety Science*, Jg. 72, S. 310–314, Feb. 2015, ISSN: 09257535. DOI: 10.1016/j.ssci.2014.09.017. Adresse: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925753514002276> (besucht am 08.05.2019).
- [122] K. Gruchalla, “Immersive well-path editing: Investigating the added value of immersion”, in *IEEE Virtual Reality 2004*, Chicago, IL, USA: IEEE, 2004, S. 157–164, ISBN: 978-0-7803-8415-6. DOI: 10.1109/VR.2004.1310069. Adresse: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1310069/> (besucht am 30.08.2019).
- [127] P. Häfner, V. Häfner und J. Ovtcharova, “Teaching Methodology for Virtual Reality Practical Course in Engineering Education”, *Procedia Computer Science*, 2013 International Conference on Virtual and Augmented Reality in Education, Jg. 25, S. 251–260, 1. Jan. 2013, ISSN: 1877-0509. DOI: 10.1016/j.procs.2013.11.031. Adresse: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050913012362> (besucht am 10.09.2019).
- [129] J. Hagel. (17. März 2015). Die Geschichte des Cloud Computing, Adresse: <https://www.hagel-it.de/cloud/die-geschichte-des-cloud-computing.html> (besucht am 07.08.2019).
- [130] M. Hakkarainen, C. Woodward und K. Rainio, “Software Architecture for Mobile Mixed Reality and 4D BIM Interaction”, S. 8, Jan. 2009. Adresse: http://virtual.vtt.fi/virtual/proj2/multimedia_old/publications/CIB-W78_v1.1.pdf (besucht am 15.04.2019).
- [132] D. Harley, A. Verni, M. Willis, A. Ng, L. Bozzo und A. Mazalek, “Sensory VR: Smelling, Touching, and Eating Virtual Reality”, in *Proceedings of the Twelfth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction - TEI '18*, Stockholm, Sweden: ACM Press, 2018, S. 386–397, ISBN: 978-1-4503-5568-1. DOI: 10.1145/3173225.3173241. Adresse: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=3173225.3173241> (besucht am 27.06.2019).
- [134] O. Hartmann, “Motion Capturing”, Vorlesung (Ulm), 2005, Adresse: <http://www-vs.informatik.uni-ulm.de/teach/ws05/tsp/Folien/Oliver%20Hartmann%20-%20Motion%20Capturing%20-%20Folien.pdf> (besucht am 07.08.2019).
- [135] C. Heeter, “Being There: The Subjective Experience of Presence”, *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Jg. 1, Nr. 2, S. 262–271, Jan. 1992, ISSN: 1054-7460, 1531-3263. DOI: 10.1162/pres.1992.1.2.262. Adresse: <http://www.mitpressjournals.org/doi/10.1162/pres.1992.1.2.262> (besucht am 16.10.2019).

-
- [136] M. Heilig, "Sensorama Simulator", Pat. 3 050 870, 28. Aug. 1962. Adresse: <http://www.mortonheilig.com/SensoramaPatent.pdf> (besucht am 15.08.2019).
- [137] J. Heimbach. (19. Juli 2018). The History of CAD, Adresse: https://www.cadenas.de/files/cadenas/images/content/infographics/history_of_cad.png (besucht am 07.08.2019).
- [138] Heimkinoraum. (11. Juni 2019). Welche Dolby Surround Anlage Für Wen?, Adresse: <https://www.heimkinoraum.de/tests/dolby-surround-systeme-8211%3B-von-den-anfaengen-bis-dolby-atmos-54> (besucht am 11.06.2019).
- [140] A. Heydarian, J. P. Carneiro, D. Gerber, B. Becerik-Gerber, T. Hayes und W. Wood, "Immersive virtual environments versus physical built environments: A benchmarking study for building design and user-built environment explorations", *Automation in Construction*, Jg. 54, S. 116–126, Juni 2015, ISSN: 09265805. DOI: 10.1016/j.autcon.2015.03.020. Adresse: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580515000606> (besucht am 23.10.2019).
- [143] M. Huff. (2019). Dorsch Lexikon der Psychologie - Verlag Hans Huber, Adresse: <https://portal.hogrefe.com/dorsch/immersion/> (besucht am 08.05.2019).
- [144] M. Huff. (2019). Dorsch Lexikon der Psychologie - Verlag Hans Huber, Adresse: <https://portal.hogrefe.com/dorsch/virtuelle-realitaet/> (besucht am 10.05.2019).
- [145] K. Hufnagel. (2018). Die Geschichte des Handys: Von Telefonzelle zu Smartphone, Adresse: <https://www.toptarif.de/handy/wissen/handy-geschichte/> (besucht am 07.08.2019).
- [151] J. Jerald, *The VR Book: Human-Centered Design for Virtual Reality*, First edition, Ser. ACM Books 8. New York: acm, Association for Computing Machinery, 2016, 599 S., OCLC: 945367096, ISBN: 978-1-970001-12-9.
- [152] L. Jones, C. A. Bowers, D. Washburn, A. Cortes und R. V. Satya, "The Effect of Olfaction on Immersion into Virtual Environments", *Human performance, situation awareness and automation: Issues and considerations for the 21st century*, S. 282–285, 2004.
- [154] P. Katsioloudis, M. Jones und V. Jovanovic, "Use of Virtual Reality Head-Mounted Displays for Engineering Technology Students and Implications on Spatial Visualization", *Engineering Design Graphics Journal*, Jg. 81, Nr. 1, 1. Jan. 2017. Adresse: https://digitalcommons.odu.edu/stemps_fac_pubs/63.
- [156] F. Ke, S. Lee und X. Xu, "Teaching training in a mixed-reality integrated learning environment", *Computers in Human Behavior*, Jg. 62, S. 212–220, Sep. 2016, ISSN: 07475632. DOI: 10.1016/j.chb.2016.03.094. Adresse: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0747563216302655> (besucht am 08.05.2019).
- [157] K. Kemnitz. (10. Jan. 2014). Die erste Fotografie der Welt - kwerfeldein – Magazin für Fotografie, Adresse: <https://kwerfeldein.de/2014/01/10/die-erste-fotografie-der-welt/> (besucht am 07.08.2019).

-
- [158] R. S. Kennedy, N. E. Lane, K. S. Berbaum und M. G. Lilienthal, "Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness", *The International Journal of Aviation Psychology*, Jg. 3, Nr. 3, S. 203–220, Juli 1993, ISSN: 1050-8414, 1532-7108. DOI: 10.1207/s15327108ijap0303_3. Adresse: http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1207/s15327108ijap0303_3 (besucht am 16.10.2019).
- [159] J. Kieferle und U. Woessner, "BIM Interactive - About Combining BIM and Virtual Reality", S. 7, 2015. Adresse: <https://bit.ly/34CI852> (besucht am 18.05.2019).
- [161] K. Kim, M. Z. Rosenthal, D. J. Zielinski und R. Brady, "Effects of Virtual Environment Platforms on Emotional Responses", *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, Jg. 113, Nr. 3, S. 882–893, 1. März 2014, ISSN: 0169-2607. DOI: 10.1016/j.cmpb.2013.12.024. Adresse: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169260713004148> (besucht am 09.09.2019).
- [164] P. Kortum, Hrsg., *HCI beyond the GUI: Design for Haptic, Speech, Olfactory and Other Nontraditional Interfaces*, The Morgan Kaufmann Series in Interactive Technologies, Amsterdam: Morgan Kaufmann, 2008, 462 S., ISBN: 978-0-12-374017-5.
- [165] V. Kovalcik, J. Flasar und J. Sochor, "Extensible Approach to the Virtual Worlds Editing", in *ACM International Conference on Computer Graphics, Virtual Reality and Visualisation in Africa*, 1. Jan. 2007, S. 31–37. DOI: 10.1145/1294685.1294691.
- [166] M. Krijn, P. M. Emmelkamp, R. Biemond, C. de Wilde de Ligny, M. J. Schuemie und C. A. van der Mast, "Treatment of acrophobia in virtual reality: The role of immersion and presence", *Behaviour Research and Therapy*, Jg. 42, Nr. 2, S. 229–239, Feb. 2004, ISSN: 00057967. DOI: 10.1016/S0005-7967(03)00139-6. Adresse: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0005796703001396> (besucht am 08.05.2019).
- [167] J. Krischler, "Mixed Reality in der universitären Tragwerkslehre", S. 9, 2019.
- [168] KUKA AG. (16. März 2020). Industrieroboter, Adresse: <https://www.kuka.com/de-de/produkte-leistungen/robotersysteme/industrieroboter> (besucht am 16.03.2020).
- [170] P. D. R. Lackes. (2019). Definition: Anwendung, Adresse: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/anwendung-30014> (besucht am 18.06.2019).
- [172] J. J. LaViola, "A discussion of cybersickness in virtual environments", *ACM SIGCHI Bulletin*, Jg. 32, Nr. 1, S. 47–56, 1. Jan. 2000, ISSN: 07366906. DOI: 10.1145/333329.333344. Adresse: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=333329.333344> (besucht am 16.10.2019).
- [173] G. Lawson, D. Salanitri und B. Waterfield, "Future directions for the development of virtual reality within an automotive manufacturer", *Applied Ergonomics*, Jg. 53, S. 323–330, März 2016, ISSN: 00036870. DOI: 10.1016/j.apergo.2015.06.024. Adresse: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0003687015300260> (besucht am 27.06.2019).
- [176] J. Leder, T. Horlitz, P. Puschmann, V. Wittstock und A. Schütz, "Comparing immersive virtual reality and powerpoint as methods for delivering safety training: Impacts on risk perception, learning, and decision making", *Safety Science*, Jg. 111, S. 271–286, Jan. 2019, ISSN: 09257535. DOI: 10.1016/j.ssci.2018.07.021. Adresse: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925753518302832> (besucht am 08.05.2019).

-
- [180] T. Lentz, D. Schröder, M. Vorländer und I. Assenmacher, “Virtual Reality System with Integrated Sound Field Simulation and Reproduction”, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, Jg. 2007, Nr. 1, Dez. 2007, ISSN: 1687-6180. DOI: 10.1155/2007/70540. Adresse: <https://asp-urasipjournals.springeropen.com/articles/10.1155/2007/70540> (besucht am 27.06.2019).
- [192] M. Malyshev, “Sound production for 360 videos”, S. 43, 2018. Adresse: <https://core.ac.uk/download/pdf/161431945.pdf> (besucht am 14.08.2019).
- [197] P.D.D. Markgraf. (2019). Definition: Augmented Reality, Adresse: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/augmented-reality-53628> (besucht am 18.06.2019).
- [198] G. Mastoropoulou und A. Chalmers, “The effect of music on the perception of display rate and duration of animated sequences: An experimental study”, in *Proceedings Theory and Practice of Computer Graphics, 2004.*, Bournemouth, UK: IEEE, 2004, S. 128–134, ISBN: 978-0-7695-2137-4. DOI: 10.1109/TPCG.2004.1314462. Adresse: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1314462/> (besucht am 12.08.2019).
- [202] Medi-Learn Verlag, *Gelenktypen und Freiheitsgrade*, 30. Apr. 2014. Adresse: <https://www.medi-learn.de/examen/PDFs/Ana5/9c65ef8c15b31bd34e2950970c22d67d.pdf> (besucht am 20.11.2019).
- [203] M. Meehan, B. Insko, M. Whitton und F.P. Brooks, “Physiological Measures of Presence in Stressful Virtual Environments”, S. 8, 2002.
- [204] Merriam-Webster. (2019). Definition of Virtual Reality, Adresse: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/virtual+reality> (besucht am 12.08.2019).
- [209] P. Milgram, H. Takemura, A. Utsumi und F. Kishino, “Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum”, H. Das, Hrsg., Boston, MA, 21. Dez. 1995, S. 282–292. DOI: 10.1117/12.197321. Adresse: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=981543> (besucht am 12.08.2019).
- [210] M. Mori, K. MacDorman und N. Kageki, “The Uncanny Valley [From the Field]”, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Jg. 19, Nr. 2, S. 98–100, Juni 2012, ISSN: 1070-9932. DOI: 10.1109/MRA.2012.2192811. Adresse: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6213238/> (besucht am 19.11.2019).
- [212] B. G. Munyan, S. M. Neer, D. C. Beidel und F. Jentsch, “Olfactory Stimuli Increase Presence in Virtual Environments”, *PLOS ONE*, Jg. 11, Nr. 6, C. Scavone, Hrsg., 16. Juni 2016, ISSN: 1932-6203. DOI: 10.1371/journal.pone.0157568. Adresse: <http://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0157568> (besucht am 27.06.2019).
- [215] H. Nakamura und H. Miyashita, “Augmented gustation using electricity”, in *Proceedings of the 2nd Augmented Human International Conference on - AH '11*, Tokyo, Japan: ACM Press, 2011, S. 1–2, ISBN: 978-1-4503-0426-9. DOI: 10.1145/1959826.1959860. Adresse: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1959826.1959860> (besucht am 27.06.2019).

-
- [217] T. Narumi, S. Nishizaka, T. Kajinami, T. Tanikawa und M. Hirose, "Augmented reality flavors: Gustatory display based on edible marker and cross-modal interaction", in *Proceedings of the 2011 Annual Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '11*, Vancouver, BC, Canada: ACM Press, 2011, S. 93, ISBN: 978-1-4503-0228-9. DOI: 10.1145/1978942.1978957. Adresse: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=1978942.1978957> (besucht am 27.06.2019).
- [220] D. D. I. für Normung e.V., "DIN EN ISO 9000:2015-11 Qualitätsmanagementsysteme", Beuth Verlag GmbH, Nov. 2015. DOI: <https://dx.doi.org/10.31030/2325650>. Adresse: <https://www.beuth.de/de/-/-/235671064> (besucht am 27.01.2020).
- [227] N. Osmers, "Augmentierte und virtuelle Realität im Fokus auf Lernen und Training in deutschsprachigen Unternehmen", S. 52, 2018.
- [229] R. Pausch, D. Proffitt und G. Williams, "Quantifying immersion in virtual reality", in *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques - SIGGRAPH '97*, Not Known: ACM Press, 1997, S. 13–18, ISBN: 978-0-89791-896-1. DOI: 10.1145/258734.258744. Adresse: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=258734.258744> (besucht am 08.05.2019).
- [242] S. Razzaque, Z. Kohn und M. C. Whitton, *Redirected Walking*. Citeseer, 2001. Adresse: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.132.4818&rep=rep1&type=pdf> (besucht am 05.04.2019).
- [243] F. Rebelo, E. Duarte, P. Noriega und M. Soares, "Virtual Reality in Consumer Product Design: Methods and Applications", in *Human Factors and Ergonomics in Consumer Product Design*, N. Stanton, Hrsg., Bd. 20110990, CRC Press, 22. Juni 2011, S. 381–402, ISBN: 978-1-4200-4629-8. DOI: 10.1201/b10950-28. Adresse: <http://www.crcnetbase.com/doi/abs/10.1201/b10950-28> (besucht am 08.05.2019).
- [246] E. Richard, A. Tijou, P. Richard und J.-L. Ferrier, "Multi-modal virtual environments for education with haptic and olfactory feedback", *Virtual Reality*, Jg. 10, Nr. 3-4, S. 207–225, 17. Nov. 2006, ISSN: 1359-4338, 1434-9957. DOI: 10.1007/s10055-006-0040-8. Adresse: <http://link.springer.com/10.1007/s10055-006-0040-8> (besucht am 27.06.2019).
- [247] D. Richards und M. Taylor, "A Comparison of learning gains when using a 2D simulation tool versus a 3D virtual world: An experiment to find the right representation involving the Marginal Value Theorem", *Computers & Education*, Jg. 86, S. 157–171, Aug. 2015, ISSN: 03601315. DOI: 10.1016/j.compedu.2015.03.009. Adresse: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360131515000780> (besucht am 08.05.2019).
- [250] M. Roupe, M. Johansson, L. Maftai, R. Lundstedt und M. Viklund-Tallgren, "Virtual Collaborative Design Environment (ViCoDE), Supporting Seamless Integration of Multi-Touch Table and Immersive VR", 2019. Adresse: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-00220-6_32 (besucht am 24.10.2019).
- [257] W. Scheidle. (2019). CIELab.de - Das CIE-Farbdiagramm, Adresse: <http://www.cielab.de/cie.shtml> (besucht am 13.08.2019).

- [259] S. Schnabel. (2012). Entstehung Des Internets | Sicherheitslücken Im Internet, Adresse: <http://www.informatik.uni-oldenburg.de/~iug10/sli/index06d0.html?q=node/20> (besucht am 07.08.2019).
- [261] J. Schönfeld, "Die Stereoskopie. Zu Ihrer Geschichte Und Ihrem Medialen Kontext", Fakultät für Kulturwissenschaften, Tübingen, Magisterarbeit, 2000. Adresse: <https://publikationen.uni-tuebingen.de/xmlui/handle/10900/46157> (besucht am 07.08.2019).
- [263] C. Schwöbel, "Digitale Spielmethode Zur Verbesserung Des Energieeffizienten Verhaltens in Privaten Haushalten", TU Darmstadt, 2015.
- [273] B. Serrano, R. M. Baños und C. Botella, "Virtual reality and stimulation of touch and smell for inducing relaxation: A randomized controlled trial", *Computers in Human Behavior*, Jg. 55, S. 1–8, Feb. 2016, ISSN: 07475632. DOI: 10.1016/j.chb.2015.08.007. Adresse: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0747563215300856> (besucht am 27.06.2019).
- [275] W. R. Sherman und A. B. Craig, *Understanding Virtual Reality: Interface, Application, and Design*, Second edition, Ser. The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics. Cambridge, MA: Morgan Kaufmann, 2019, 908 S., ISBN: 978-0-12-818399-1.
- [281] M. Slater, "A Note on Presence Terminology", *Presence connect*, Jg. 3, Nr. 3, S. 1–5, 2003.
- [289] S. R. Soomro, E. Ulusoy und H. Urey, "Decoupling of Real and Digital Content in Projection-based Augmented Reality Systems Using Time Multiplexed Image Capture", *Electronic Imaging*, Jg. 2017, Nr. 3, S. 54–59, 29. Jan. 2017, ISSN: 2470-1173. DOI: 10.2352/ISSN.2470-1173.2017.3.ERVR-097. Adresse: <http://www.ingentaconnect.com/content/10.2352/ISSN.2470-1173.2017.3.ERVR-097> (besucht am 25.10.2019).
- [290] Stanford University. (19. Aug. 2014). The Stanford 3D Scanning Repository, Adresse: <http://graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep/> (besucht am 19.08.2019).
- [293] R. L. Storms, "Auditory-Visual Cross-Modal Perception Phenomena", S. 289, 1998. Adresse: <https://calhoun.nps.edu/handle/10945/8010> (besucht am 14.08.2019).
- [296] I. E. Sutherland, "Sketchpad a Man-Machine Graphical Communication System", S. 18, 1963. Adresse: <https://www.cl.cam.ac.uk/techreports/UCAM-CL-TR-574.pdf> (besucht am 16.08.2019).
- [297] I. E. Sutherland, "A Head-Mounted Three Dimensional Display", in *Proceedings of the December 9-11, 1968, Fall Joint Computer Conference, Part I*, Ser. AFIPS '68 (Fall, Part I), San Francisco, California: ACM, 1968, S. 757–764. DOI: 10.1145/1476589.1476686. Adresse: <http://doi.acm.org/10.1145/1476589.1476686> (besucht am 10.09.2019).
- [308] R. Tortell, D. P. Luigi, A. Dozois, S. Bouchard, J. F. Morie und D. Ilan, "The effects of scent and game play experience on memory of a virtual environment", *Virtual Reality*, Jg. 11, Nr. 1, S. 61–68, 1. März 2007, ISSN: 1434-9957. DOI: 10.1007/s10055-006-0056-0. Adresse: <https://doi.org/10.1007/s10055-006-0056-0> (besucht am 09.09.2019).
- [324] M. Virvou, G. Katsionis und K. Manos, "Combining Software Games with Education: Evaluation of its Educational Effectiveness", S. 12, 2005. Adresse: <https://pdfs.semanticscholar.org/43d3/dd5cbb10510c7966ac0f849d98e899f056f1.pdf#page=59> (besucht am 15.04.2019).

-
- [334] C. Visser. (12. Juli 2014). Fernsehgeräte von 1990 Bis Heute : Die Glotzen Der Nation - Wirtschaft - Tagesspiegel, Adresse: <https://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/fernsehgeraete-von-1990-bis-heute-die-glotzen-der-nation/10190994.html> (besucht am 07.08.2019).
- [339] J. Wang, X. Wang, W. Shou und B. Xu, "Integrating BIM and augmented reality for interactive architectural visualisation", *Construction Innovation*, Jg. 14, Nr. 4, F. Pour Rahimian und R. Ibrahim, Hrsg., S. 453–476, 30. Sep. 2014, ISSN: 1471-4175. DOI: 10.1108/CI-03-2014-0019. Adresse: <http://www.emeraldinsight.com/doi/10.1108/CI-03-2014-0019> (besucht am 08.05.2019).
- [340] P. Wang, P. Wu, J. Wang, H.-L. Chi und X. Wang, "A Critical Review of the Use of Virtual Reality in Construction Engineering Education and Training", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Jg. 15, Nr. 6, S. 1204, 8. Juni 2018, ISSN: 1660-4601. DOI: 10.3390/ijerph15061204. Adresse: <http://www.mdpi.com/1660-4601/15/6/1204> (besucht am 23.10.2019).
- [341] X. Wang, S. K. Ong und A. Y. C. Nee, "A comprehensive survey of augmented reality assembly research", *Advances in Manufacturing*, Jg. 4, Nr. 1, S. 1–22, März 2016, ISSN: 2095-3127, 2195-3597. DOI: 10.1007/s40436-015-0131-4. Adresse: <http://link.springer.com/10.1007/s40436-015-0131-4> (besucht am 23.10.2019).
- [342] X. Wang, P. E. Love, M. J. Kim, C.-S. Park, C.-P. Sing und L. Hou, "A conceptual framework for integrating building information modeling with augmented reality", *Automation in Construction*, Jg. 34, S. 37–44, Sep. 2013, ISSN: 09265805. DOI: 10.1016/j.autcon.2012.10.012. Adresse: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580512001793> (besucht am 23.10.2019).
- [343] V. Weber. (10. Sep. 2015). 25 Jahre WLAN, Adresse: <https://www.heise.de/newsticker/meldung/25-Jahre-WLAN-2789709.html> (besucht am 07.08.2019).
- [344] D. M. Whittinghill, B. Ziegler, T. Case und B. Moore, "Nasum Virtualis: A Simple Technique for Reducing Simulator Sickness", in *Games Developers Conference (GDC)*, 2015, S. 74.
- [346] M. A. Wirtz. (2019). Dorsch Lexikon der Psychologie - Verlag Hans Huber - Stichwort Detailseite, Adresse: <https://portal.hogrefe.com/dorsch/presenz/> (besucht am 25.10.2019).
- [347] S. Woksepp und T. Olofsson, "Credibility and applicability of virtual reality models in design and construction", *Advanced Engineering Informatics*, Jg. 22, Nr. 4, S. 520–528, Okt. 2008, ISSN: 14740346. DOI: 10.1016/j.aei.2008.06.007. Adresse: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1474034608000517> (besucht am 13.12.2019).
- [348] Y. Xie, Y. Zhang und Y. Cai, "Virtual Reality Engine Disassembly Simulation with Natural Hand-Based Interaction", in, Jan. 2019, S. 121–128, ISBN: 9789811328442. DOI: 10.1007/978-981-13-2844-2_11.
- [356] K. Yousif, A. Bab-Hadiashar und R. Hoseinnezhad, "An Overview to Visual Odometry and Visual SLAM: Applications to Mobile Robotics", *Intelligent Industrial Systems*, Jg. 1, Nr. 4, S. 289–311, Dez. 2015, ISSN: 2363-6912, 2199-854X. DOI: 10.1007/s40903-015-0032-7. Adresse: <http://link.springer.com/10.1007/s40903-015-0032-7> (besucht am 18.06.2019).

-
- [357] P. D. C. Zabel, P. D. G. Heisenberg und V. Telkmann, "XR in NRW Potenziale und Bedarfe der nordrhein-westfälischen Virtual, Mixed und Augmented Reality-Branche", TH Köln, Köln, Studie, 26. Juni 2019.
- [361] D. Zivadinovic. (11. Jan. 2018). Vor 20 Jahren begann die Bluetooth-Ära, Adresse: <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Vor-20-Jahren-begann-die-Bluetooth-Aera-3938211.html> (besucht am 07.08.2019).
- [362] M. Zyda, "From visual simulation to virtual reality to games", *Computer*, Jg. 38, Nr. 9, S. 25–32, Sep. 2005, ISSN: 0018-9162. DOI: 10.1109/MC.2005.297. Adresse: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1510565/> (besucht am 08.05.2019).

Nicht veröffentlichte studentische Abschlussarbeiten

- [20] M. Belwe, “Methoden der virtuellen Realität zur motivierenden Verständnissteigerung energetischer Simulationen und Sanierungsmaßnahmen”, Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen, TU Darmstadt, Darmstadt, Germany, Master Thesis, 2018.
- [41] D. N. Breuer, “Analyse von Mensch-Maschine-Schnittstellen für VR-Anwendungen im Bauwesen”, Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen, TU Darmstadt, Darmstadt, Germany, Bachelor Thesis, 2017.
- [124] E.-M. Gülacti, “Untersuchung von VR-Methoden im Bereich des e-Learnings am Beispiel der Technischen Mechanik”, Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen, TU Darmstadt, Darmstadt, Germany, Bachelor Thesis, 2019.
- [139] T. Heinz, “Steigerung der Immersion in Virtual Reality anhand innovativer Tracking-Technologien am Beispiel von Brandschutz- Ingenieur Anwendungen”, Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen, TU Darmstadt, Darmstadt, Bachelor Thesis, 2018. Adresse: <https://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/105723/>.
- [189] Y. Lou, “Investigation of visualization possibilities of digital components and their structural-physical measured values in virtual reality”, Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen, TU Darmstadt, Darmstadt, Germany, Master Thesis, 2018.
- [211] P. Mosler, “Analyse und Auswertung von Serious Gaming Methoden zum Training der Brandbekämpfung am Beispiel der Anwendung von Feuerlöschern”, Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen, TU Darmstadt, Darmstadt, Germany, Bachelor Thesis, 2018. Adresse: <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/103843/>.
- [300] S. Tariverdian, “Smartphone-gestützte Einrichtung und Visualisierung von Sensoren am Beispiel eines Monitoring-Prozesses zur Messung der Raumtemperatur”, Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen, TU Darmstadt, Darmstadt, Germany, Bachelor Thesis, 2019.

- [7] M. Al-Adhami, L. Ma und S. Wu, “Exploring Virtual Reality in Construction, Visualization and Building Performance Analysis”, **presented at** 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Taipei, Taiwan, 22. Juli 2018. DOI: 10.22260/ISARC2018/0135. Adresse: http://www.iaarc.org/publications/2018_proceedings_of_the_35th_isarc/exploring_virtual_reality_in_construction_visualization_and_building_performance_analysis.html (besucht am 23.10.2019).
- [11] D. Annutsch. (2018). Projekt ARSUL, Adresse: <http://projekt-arsul.de/> (besucht am 10.12.2019).
- [17] H. Bae, M. Golparvar-Fard und J. White, “High-precision vision-based mobile augmented reality system for context-aware architectural, engineering, construction and facility management (AEC/FM) applications”, *Visualization in Engineering*, Jg. 1, Nr. 1, Dez. 2013, ISSN: 2213-7459. DOI: 10.1186/2213-7459-1-3. Adresse: <https://viejournal.springeropen.com/articles/10.1186/2213-7459-1-3> (besucht am 23.10.2019).
- [22] J. Benham. (2016). SmartReality Augmented and Virtual Reality BIM Mobile App, Adresse: <https://smartreality.co/> (besucht am 13.12.2019).
- [31] D. Z. Boghossian, A. Malekian, A. Manukyan und B. Bogosian. (2018). Augmentecture - Augmented Reality for Design Collaboration. YouTube-Video: https://youtu.be/_QtOf_7E8Yk, Adresse: <https://www.augmentecture.com/> (besucht am 13.12.2019).
- [32] A. Böhm. (26. Sep. 2019). Magicplan | Marktführer Für Grundrisserstellung, Renovierung & Gutachten. YouTube-Video: https://youtu.be/hGoa_chMJ54, Adresse: <https://www.magicplan.app/de/> (besucht am 13.12.2019).
- [60] M. Chu, J. Matthews und P. E. D. Love, “Integrating mobile Building Information Modelling and Augmented Reality systems: An experimental study”, *Automation in Construction*, Jg. 85, S. 305–316, 1. Jan. 2018, ISSN: 0926-5805. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.10.032. Adresse: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580517301218> (besucht am 23.10.2019).
- [73] Dalux. (2019). Dalux TwinBIM | BIM on construction site through Augmented Reality (AR). YouTube-Video: <https://www.youtube.com/watch?v=pRsoRxZgtNU>, Adresse: <https://www.dalux.com/dalux-field/twinbim/> (besucht am 13.12.2019).
- [81] C. Dolas. (2018). Augmented Reality in der Bauindustrie. YouTube-Video: <https://youtu.be/e0uSe-PiATg>, Adresse: <http://gamma-app.de/> (besucht am 13.12.2019).
- [88] R. Eiris, M. Gheisari und B. Esmaeili, “PARS: Using Augmented 360-Degree Panoramas of Reality for Construction Safety Training”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Jg. 15, Nr. 11, S. 2452, 3. Nov. 2018, ISSN: 1660-4601. DOI: 10.3390/ijerph15112452. Adresse: <http://www.mdpi.com/1660-4601/15/11/2452> (besucht am 12.12.2019).
- [90] C. Eller, “Interaktive BIM-Modellierung von 3D-Objekten in der virtuellen Realität”, Ser. 29, 2017, S. 8.

- [113] Future Sight AR. (2019). Katana. YouTube-Video: <https://youtu.be/0sqZZKhgPvY>, Adresse: <https://www.futuresightar.com/our-products> (besucht am 08.01.2020).
- [115] M. Golparvar-Fard, F. Peña-Mora und S. Savarese, "D4AR - a 4-dimensional augmented reality model for automating construction progress monitoring data collection, processing and communication", S. 25, 2009.
- [123] Grymala. (2019). Grymala | Mobile Apps Development. YouTube-Video: <https://youtu.be/Pnybegzg104>, Adresse: <https://www.grymala.by/> (besucht am 13.12.2019).
- [125] D. S. Habig. (31. Aug. 2018). Augmented Reality Chemistry (ARC) – VR/AR-Learning, Adresse: <https://www.uni-potsdam.de/vrar1/index.php/2018/08/31/augmented-reality-chemistry-arc/> (besucht am 08.01.2020).
- [126] S. Habig, "Augmented Reality Chemistry – Förderung internaler Modellrepräsentation in Organischer Chemie durch AR", *Gesellschaft für Informatik e.V.z*, 2019. DOI: 10.18420/delfi2019-ws-115. Adresse: <http://dl.gi.de/handle/20.500.12116/27954> (besucht am 10.12.2019).
- [131] A. Hammad, H. Wang und S. P. Mudur, "Distributed Augmented Reality for Visualizing Collaborative Construction Tasks", *Journal of Computing in Civil Engineering*, Jg. 23, Nr. 6, S. 418–427, Nov. 2009, ISSN: 0887-3801, 1943-5487. DOI: 10.1061/(ASCE)0887-3801(2009)23:6(418). Adresse: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290887-3801%282009%2923%3A6%28418%29> (besucht am 23.10.2019).
- [141] T. Hilfert und M. König, "Low-cost virtual reality environment for engineering and construction", *Visualization in Engineering*, Jg. 4, Nr. 1, Dez. 2016, ISSN: 2213-7459. DOI: 10.1186/s40327-015-0031-5. Adresse: <http://www.viejournal.com/content/4/1/2> (besucht am 12.12.2019).
- [146] Y. M. Ibrahim, A. P. Kaka, G. Aouad und M. Kagioglou, "As-built Documentation of Construction Sequence by Integrating Virtual Reality with Time-lapse Movies", *Architectural Engineering and Design Management*, Jg. 4, Nr. 2, S. 73–84, Jan. 2008, ISSN: 1745-2007, 1752-7589. DOI: 10.3763/aedm.2008.0074. Adresse: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.3763/aedm.2008.0074> (besucht am 12.12.2019).
- [150] Jens Hertwig. (2020). Augmented Reality im CAFM | SPARTACUS. YouTube-Video: <https://youtu.be/AKjiKxSFUBg?list=PLFbbvaHbLzThZPDaLxpKjIzhlUPXB3kSu>, Adresse: <https://www.spartacus-fm.de/de/trends/augmented-reality> (besucht am 08.01.2020).
- [153] Kalloc Studios. (2019). Fuzor. YouTube-Video: <https://www.youtube.com/user/FuzorBIMExtender>, Adresse: <https://www.kalloctech.com/vrcollab.jsp> (besucht am 11.12.2019).
- [160] H. S. Kim, S.-K. Kim, A. Borrmann und L. S. Kang, "Improvement of Realism of 4D Objects Using Augmented Reality Objects and Actual Images of a Construction Site", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Jg. 22, Nr. 8, S. 2735–2746, Aug. 2018, ISSN: 1226-7988, 1976-3808. DOI: 10.1007/s12205-017-0734-3. Adresse: <http://link.springer.com/10.1007/s12205-017-0734-3> (besucht am 23.10.2019).
- [163] D.-I. P. Klimant. (2020). Auvirea GmbH, Adresse: <https://www.auvirea.com/de/> (besucht am 08.01.2020).

- [169] O.-S. Kwon, C.-S. Park und C.-R. Lim, "A defect management system for reinforced concrete work utilizing BIM, image-matching and augmented reality", *Automation in Construction*, Jg. 46, S. 74–81, Okt. 2014, ISSN: 09265805. DOI: 10.1016/j.autcon.2014.05.005. Adresse: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580514001162> (besucht am 23.10.2019).
- [174] Q. T. Le, A. Pedro, C. R. Lim, H. T. Park, C. S. Park und H. K. Kim, "A Framework for Using Mobile Based Virtual Reality and Augmented Reality for Experiential Construction Safety Education", S. 14, 2015. Adresse: https://www.researchgate.net/profile/Chansik_Park3/publication/276025929_A_Framework_for_Using_Mobile_Based_Virtual_Reality_and_Augmented_Reality_for_Experiential_Construction_Safety_Education/links/554e218708ae93634ec70057.pdf (besucht am 12.04.2019).
- [175] Q. T. Le, A. Pedro und C. S. Park, "A Social Virtual Reality Based Construction Safety Education System for Experiential Learning", *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Jg. 79, Nr. 3-4, S. 487–506, Aug. 2015, ISSN: 0921-0296, 1573-0409. DOI: 10.1007/s10846-014-0112-z. Adresse: <http://link.springer.com/10.1007/s10846-014-0112-z> (besucht am 23.10.2019).
- [177] S. Lee und Ö. Akin, "Augmented reality-based computational fieldwork support for equipment operations and maintenance", *Automation in Construction*, Jg. 20, Nr. 4, S. 338–352, Juli 2011, ISSN: 09265805. DOI: 10.1016/j.autcon.2010.11.004. Adresse: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580510001834> (besucht am 06.01.2020).
- [183] H. Li, G. Chan und M. Skitmore, "Multiuser Virtual Safety Training System for Tower Crane Dismantlement", *Journal of Computing in Civil Engineering*, Jg. 26, Nr. 5, S. 638–647, Sep. 2012, ISSN: 0887-3801, 1943-5487. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000170. Adresse: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29CP.1943-5487.0000170> (besucht am 13.12.2019).
- [190] Ludus. (2019). Application of the virtual reality in the industry. YouTube-Video: <https://youtu.be/GqbZc-BseDM>, Adresse: <https://www.ludus-vr.com/en/areas/industry/> (besucht am 07.01.2020).
- [196] Map Systems. (2019). Augmented Reality Services | AR Company | MAP Systems. YouTube-Video: <https://youtu.be/sT9unIaP6gQ>, Adresse: <https://mapsystemsindia.com/augmented-reality-services.html> (besucht am 08.01.2020).
- [205] S. Meža, Ž. Turk und M. Dolenc, "Measuring the potential of augmented reality in civil engineering", *Advances in Engineering Software*, Jg. 90, S. 1–10, Dez. 2015, ISSN: 09659978. DOI: 10.1016/j.advensoft.2015.06.005. Adresse: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0965997815000915> (besucht am 13.12.2019).
- [218] "VAR² 2017 – Realität Erweitern", in 4. Fachkonferenz Zu VR/AR-Technologien an Der Professur Werkzeugmaschinen Und Umformtechnik Der TU Chemnitz, P. D.-I. h. R. Neugebauer, P. D.-I. M. Putz und D.-I. P. Klimant, Hrsg., Chemnitz, 2017, ISBN: 978-3-00-058419-0. Adresse: <http://www.tu-chemnitz.de/mb/WerkzMasch/>.

-
- [228] C.-S. Park und H.-J. Kim, "A framework for construction safety management and visualization system", *Automation in Construction*, Jg. 33, S. 95–103, Aug. 2013, ISSN: 09265805. DOI: 10.1016/j.autcon.2012.09.012. Adresse: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580512001616> (besucht am 23.10.2019).
- [230] A. Perlman, R. Sacks und R. Barak, "Hazard recognition and risk perception in construction", *Safety Science*, Jg. 64, S. 22–31, Apr. 2014, ISSN: 09257535. DOI: 10.1016/j.ssci.2013.11.019. Adresse: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925753513002877> (besucht am 13.12.2019).
- [244] D. S. Rebsch. (2019). Building Information Modeling (BIM). YouTube-Video: <https://youtu.be/V5THDT9G8TY>, Adresse: <https://www.verosim-solutions.com/umwelt/bim/> (besucht am 13.12.2019).
- [251] P. D. U. Sachse. (30. Apr. 2019). Augmented Reality in der beruflichen Bildung – Potentialanalyse von Augmented Reality Lernszenarien im Ausbildungsberuf Mechatronik – VR/AR-Learning, Adresse: <https://www.uni-potsdam.de/vrarl/index.php/2019/04/30/augmented-reality-in-der-beruflichen-bildung-potentialanalyse-von-augmented-reality-lernszenarien-im-ausbildungsberuf-mechatronik/> (besucht am 10.12.2019).
- [252] R. Sacks, A. Perlman und R. Barak, "Construction safety training using immersive virtual reality", *Construction Management and Economics*, Jg. 31, Nr. 9, S. 1005–1017, Sep. 2013, ISSN: 0144-6193, 1466-433X. DOI: 10.1080/01446193.2013.828844. Adresse: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01446193.2013.828844> (besucht am 13.12.2019).
- [253] A. Z. Sampaio und O. P. Martins, "The application of virtual reality technology in the construction of bridge: The cantilever and incremental launching methods", *Automation in Construction*, Jg. 37, S. 58–67, Jan. 2014, ISSN: 09265805. DOI: 10.1016/j.autcon.2013.10.015. Adresse: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580513001830> (besucht am 13.12.2019).
- [260] R. Schoenfelder und D. Schmalstieg, "Augmented Reality for Industrial Building Acceptance", in *2008 IEEE Virtual Reality Conference*, März 2008, S. 83–90. DOI: 10.1109/VR.2008.4480755.
- [262] M. Schroer und T. Schubert. (2019). Virtual Reality (VR) Viewer für 3D CAD-Modelle. YouTube-Video: <https://youtu.be/ilhy4EwOzBA>, Adresse: <https://www.cad-schroer.de/produkte/m4-virtual-review/> (besucht am 13.12.2019).
- [274] H. Shanbari, N. Blinn und R. R. Issa, "Using augmented reality video in enhancing masonry and roof component comprehension for construction management students", *Engineering, Construction and Architectural Management*, Jg. 23, Nr. 6, S. 765–781, 21. Nov. 2016, ISSN: 0969-9988. DOI: 10.1108/ECAM-01-2016-0028. Adresse: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/ECAM-01-2016-0028/full/html> (besucht am 12.12.2019).
- [276] D. H. Shin und P. S. Dunston, "Technology development needs for advancing Augmented Reality-based inspection", *Automation in Construction*, Jg. 19, Nr. 2, S. 169–182, März 2010, ISSN: 09265805. DOI: 10.1016/j.autcon.2009.11.001. Adresse: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092658050900171X> (besucht am 13.12.2019).

-
- [282] VR-Soft. (2018). RivexVR. YouTube-Video: <https://www.youtube.com/watch?v=XjjIDcL75nU>, Adresse: <http://rivex-vr.com/> (besucht am 13.12.2019).
- [291] C. Steiger. (2017). BIMtoAR. YouTube-Video: <https://youtu.be/NmiOC1WZte8>, Adresse: <http://www.bimtoar.ch/> (besucht am 13.12.2019).
- [292] M. Stoevelbaek. (2019). PASCHAL AR-App | PASCHAL. YouTube-Video: <https://youtu.be/s03gN0DcWS8>, Adresse: <https://www.paschal.de/deutsch/produkte/software/paschal-ar-app.php> (besucht am 10.12.2019).
- [294] D. Studio. (2019). Augmented Reality. YouTube-Video: https://youtu.be/zVN_Pc-Ytuw, Adresse: <http://dat.my/augmented-reality/> (besucht am 08.01.2020).
- [295] X. Su, S. Talmaki, H. Cai und V. R. Kamat, "Uncertainty-aware visualization and proximity monitoring in urban excavation: A geospatial augmented reality approach", *Visualization in Engineering*, Jg. 1, Nr. 1, S. 2, 2013, ISSN: 2213-7459. DOI: 10.1186/2213-7459-1-2. Adresse: <http://viejournal.springeropen.com/articles/10.1186/2213-7459-1-2> (besucht am 13.12.2019).
- [298] D. R. Swaminathan und S. Burkard. (25. Juli 2018). LandscapAR augmented reality – Apps bei Google Play. YouTube-Video: <https://www.youtube.com/watch?v=4NyfAMwwJo>, Adresse: <https://play.google.com/store/apps/details?id=de.berlin.reality.augmented.landscapar&hl=de> (besucht am 13.12.2019).
- [307] B. Thiede, G. Posselt, S. Kauffeld und C. Herrmann, "Enhancing Learning Experience in Physical Action-orientated Learning Factories Using a Virtually Extended Environment and Serious Gaming Approaches", *Procedia Manufacturing*, Jg. 9, S. 238–244, 2017, ISSN: 23519789. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.04.042. Adresse: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2351978917301609> (besucht am 10.12.2019).
- [313] Unity. (2019). Unity Reflect: Echtzeit-BIM für das Architektur-, Ingenieur- und Bauwesen. YouTube-Video: <https://www.youtube.com/watch?v=b-vEPNON2HI>, Adresse: <https://unity.com/de/aec/reflect> (besucht am 13.12.2019).
- [319] E. Veas, R. Grasset, I. Ferencik, T. Grünwald und D. Schmalstieg, "Mobile augmented reality for environmental monitoring", *Personal and Ubiquitous Computing*, Jg. 17, Nr. 7, S. 1515–1531, Okt. 2013, ISSN: 1617-4909, 1617-4917. DOI: 10.1007/s00779-012-0597-z. Adresse: <http://link.springer.com/10.1007/s00779-012-0597-z> (besucht am 13.12.2019).
- [320] Vectorworks. (22. Juli 2019). Vectorworks Nomad. YouTube-Video: <https://youtu.be/j0E20H1D7ow>, Adresse: <https://apps.apple.com/de/app/vectorworks-nomad/id506706850> (besucht am 13.12.2019).
- [321] VirtuallyHere. (9. Mai 2017). Get Virtually Here, Adresse: <https://www.microsoft.com/en-us/p/virtually-here/9ppdgqf2dzgf> (besucht am 08.01.2020).
- [335] Visual Live 3D LLC. (2020). VisualLive - The Ultimate AEC Augmented Reality Apps! YouTube-Video: <https://www.youtube.com/watch?v=klyM95atfg4&t>, Adresse: <https://www.visuallive.com> (besucht am 08.01.2020).

-
- [345] G. Williams, M. Gheisari, P.-J. Chen und J. Irizarry, "BIM2MAR: An Efficient BIM Translation to Mobile Augmented Reality Applications", *Journal of Management in Engineering*, Jg. 31, Nr. 1, Jan. 2015, ISSN: 0742-597X, 1943-5479. DOI: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000315. Adresse: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29ME.1943-5479.0000315> (besucht am 12.12.2019).
- [358] M. Zaher, D. Greenwood und M. Marzouk, "Mobile augmented reality applications for construction projects", *Construction Innovation*, 17. Jan. 2018, ISSN: 1471-4175. DOI: 10.1108/CI-02-2017-0013. Adresse: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/CI-02-2017-0013/full/html> (besucht am 23.10.2019).
- [360] D. Zhao und J. Lucas, "Virtual reality simulation for construction safety promotion", *International Journal of Injury Control and Safety Promotion*, Jg. 22, Nr. 1, S. 57–67, 2. Jan. 2015, ISSN: 1745-7300, 1745-7319. DOI: 10.1080/17457300.2013.861853. Adresse: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17457300.2013.861853> (besucht am 13.12.2019).

Hardwarekomponenten

- [1] 3D run. (2019). Cybershoes – – Shoes for Walking in Virtual Reality, Adresse: <https://www.cybershoes.io/> (besucht am 21.08.2019).
- [2] 3DSystems, *Produktbeschreibung Phantom*, excel, 2006. Adresse: <https://de.3dsystems.com/haptics-devices/3d-systems-phantom-premium/documents>.
- [6] Acer. (2018). Acer AH101 - Technische Daten | Virtual & Mixed Reality | Acer Deutschland. excel, Adresse: <https://www.acer.com/ac/de/DE/content/model/VD.R05EE.003> (besucht am 07.06.2019).
- [12] AnthroTronix Inc., *The Scent Collar a Wearable Scent Delivery Device*, 2012. Adresse: <http://ict.usc.edu/wp-content/uploads/2012/03/ScentCollarBrochure1.pdf> (besucht am 05.09.2019).
- [13] ART GmbH. (2019). Flystick 2 - Interaction, Adresse: <https://ar-tracking.com/products/interaction/flystick-2/> (besucht am 13.11.2019).
- [14] ART GmbH. (2019). Flystick 3 - Interaction, Adresse: <https://ar-tracking.com/products/interaction/flystick-3/> (besucht am 13.11.2019).
- [15] Asus. (2019). ASUS Windows Mixed Reality Headset (HC102) | Notebook-Zubehör, Adresse: <https://www.asus.com/de/Headset/ASUS-Windows-Mixed-Reality-Headset-HC102/> (besucht am 07.06.2019).
- [16] Avatar VR. (2019). The Glove to Touch VR, Adresse: <https://avatarvr.es/> (besucht am 20.08.2019).
- [24] Beyer Dynamic. (2016). Quincy: Zusammenspiel aus T 1 und A 2 als audiophile Traumkombination., Adresse: <https://www.beyerdynamic.de/quincy.html> (besucht am 20.08.2019).
- [25] Beyer Dynamic. (2018). MMX 300: Premium Gaming Headset (2. Generation), Adresse: <https://www.beyerdynamic.de/mmx-300.html> (besucht am 20.08.2019).
- [26] Beyer Dynamic. (2018). T5p: Audiophiler portabler Tesla Hi-Fi-Kopfhörer, geschlossen (2. Generation), Adresse: <https://www.beyerdynamic.de/t-5-p-2-gen.html> (besucht am 20.08.2019).
- [27] bHaptics. (2019). bHaptics - Tactsuit, full body haptic suit for VR, Adresse: <https://www.bhaptics.com/> (besucht am 28.05.2019).
- [35] Bose. (2019). Bose Surround Speakers 700, Adresse: https://www.bose.de/de_de/products/speakers/speaker_accessories/bose-surround-speakers-700.html (besucht am 20.08.2019).
- [36] Bose. (2019). Smarte Noise Cancelling Headphones 700 | Bose, Adresse: https://www.bose.de/de_de/products/headphones/noise_cancelling_headphones/noise-cancelling-headphones-700.html (besucht am 20.08.2019).

-
- [38] M. Bouzit, G. Burdea, G. Popescu und R. Boian, "The Rutgers Master II-New Design Force-Feedback Glove", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Jg. 7, Nr. 2, S. 256–263, Juni 2002, ISSN: 1083-4435. DOI: 10.1109/TMECH.2002.1011262.
- [40] Breq Labs. (2019). BreqLabs Home, Adresse: <https://breqlabs.com/website/> (besucht am 20.08.2019).
- [43] Brunner. (2018). VR-Motion 200, Adresse: <https://www.brunner-innovation.swiss/product/vr-motion-200/> (besucht am 21.08.2019).
- [51] Captoglove. (2018). CaptoGlove - Virtual reality wearable gaming motion controller, Adresse: <https://www.captoglove.com/> (besucht am 20.08.2019).
- [55] Y.-S. Chen, P.-H. Han, K.-C. Lee, C.-E. Hsieh, J.-C. Hsiao, C.-J. Hsu, K.-W. Chen, C.-H. Chou und Y.-P. Hung, "Lotus: Enhancing the immersive experience in virtual environment with mist-based olfactory display", in *SIGGRAPH Asia 2018 Virtual & Augmented Reality on - SA '18*, Tokyo, Japan: ACM Press, 2018, S. 1–2, ISBN: 978-1-4503-6028-9. DOI: 10.1145/3275495.3275503. Adresse: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=3275495.3275503> (besucht am 27.06.2019).
- [57] Y. Ching-Chiuan. (2016). Ambiotherm | Keio-NUS CUTE Center, Adresse: <http://cutecenter.nus.edu.sg/projects/ambiotherm.html> (besucht am 20.08.2019).
- [58] Y. Ching-Chiuan. (2017). Virtual Cocktail | Keio-NUS CUTE Center, Adresse: <http://cutecenter.nus.edu.sg/projects/virtual-cocktail.html> (besucht am 20.08.2019).
- [59] Y. Ching-Chiuan. (2017). Virtual Lemonade | Keio-NUS CUTE Center, Adresse: <http://cutecenter.nus.edu.sg/projects/virtual-lemonade.html> (besucht am 20.08.2019).
- [61] Cinemizer GmbH. (2019). Cinemizer OLED Immersive Emotions for Drone First Person View (FPV) and Much More, Adresse: <https://cinemizeroled.com/> (besucht am 20.08.2019).
- [62] H.-P D. Company, "HP Reverb Virtual Reality Headset - Professional Edition", S. 8, 2019. Adresse: <https://store.hp.com/GermanyStore/Merch/Offer.aspx?p=b-hp-reverb-vr-headset#useCases>.
- [63] H. Coporation. (2018). VIVE™ Deutschland | VIVE Hardware kaufen, Adresse: <https://www.vive.com/de/product/> (besucht am 07.06.2019).
- [64] H. Coporation. (2018). VIVE Pro | The professional-grade VR headset, Adresse: <https://www.vive.com/de/product/vive-pro/> (besucht am 07.06.2019).
- [65] H. Coporation. (2019). VIVE COSMOS, Adresse: <https://www.vive.com/de/cosmos/> (besucht am 07.06.2019).
- [66] H. Coporation. (2019). VIVE Focus | VIVE Enterprise, Adresse: <https://enterprise.vive.com/de/vivefocus/> (besucht am 07.06.2019).
- [69] CuteCenter. (2018). Season Traveller | Keio-NUS CUTE Center, Adresse: <http://cutecenter.nus.edu.sg/projects/season-traveller.html> (besucht am 17.10.2019).
- [70] CyberGlove System LLC, *Produktbeschreibung CyberGrasp*, 2009. Adresse: <http://www.cyberglovesystems.com/>.

-
- [71] Cyberith. (2017). Effective VR Treadmill - Cyberith Virtualizer R&D Kit | Cyberith Virtualizer, Adresse: <https://www.cyberith.com/virtualizer-rd-kit/> (besucht am 21.08.2019).
- [72] Cyberith. (2018). 2nd Gen VR Treadmill - Cyberith Virtualizer ELITE 2 | Cyberith Virtualizer, Adresse: <https://www.cyberith.com/virtualizer-elite/> (besucht am 21.08.2019).
- [76] DextaRobotics. (2018). Dexta Robotics - Touch the Untouchable, Adresse: <https://www.dextarobotics.com/en-us> (besucht am 20.08.2019).
- [79] DJI. (2019). DJI Goggles – Spezifikationen, FAQ, Tutorials Und Guides – DJI, Adresse: <https://www.dji.com/de/dji-goggles/info> (besucht am 07.06.2019).
- [80] D. Dobbelstein, S. Herrdum und E. Rukzio, “inScent: A wearable olfactory display as an amplification for mobile notifications”, in *Proceedings of the 2017 ACM International Symposium on Wearable Computers - ISWC '17*, Maui, Hawaii: ACM Press, 2017, S. 130–137, ISBN: 978-1-4503-5188-1. DOI: 10.1145/3123021.3123035. Adresse: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=3123021.3123035> (besucht am 15.08.2019).
- [85] Eden. (2019). Eden Snacker - VR Made Easy, Adresse: <https://edensnacker.com/> (besucht am 08.01.2020).
- [87] Eight360. (2019). Eight360 | Motion VR, Adresse: <https://eight360.com/> (besucht am 21.08.2019).
- [94] Epson. (2019). Moverio BT-200, Adresse: <https://www.epson.de/products/see-through-mobile-viewer/moverio-bt-200> (besucht am 16.08.2019).
- [95] Epson. (2019). Moverio BT-300 - Epson, Adresse: <https://www.epson.de/products/see-through-mobile-viewer/moverio-bt-300> (besucht am 16.08.2019).
- [96] Epson. (2019). Moverio Pro BT-2000, Adresse: <https://www.epson.de/products/see-through-mobile-viewer/moverio-pro-bt-2000> (besucht am 16.08.2019).
- [98] EST. (2014). nVisor ST50 - EST, Engineering Systems Technologies GmbH & Co. KG, Adresse: <https://est-kl.com/manufacturer/nvis/nvisor-st50.html#more-information> (besucht am 13.11.2019).
- [99] Exhalia USA. (2019). Exhalia - Spécialistes Du Marketing Olfactif, Adresse: <https://www.exhalia.com/us/produits/espaces-olfactifs/> (besucht am 13.08.2019).
- [101] Facebook. (2018). Gear VR Powered by Oculus | Oculus, Adresse: <https://www.oculus.com/gear-vr/> (besucht am 07.06.2019).
- [102] Facebook. (2018). Oculus Rift | Oculus, Adresse: <https://www.oculus.com/rift/#oui-csl-rift-games=star-trek> (besucht am 07.06.2019).
- [103] Facebook. (2018). Oculus Rift S | Oculus, Adresse: <https://www.oculus.com/rift-s/> (besucht am 07.06.2019).
- [104] Facebook. (2019). Oculus Go: Standalone-VR-Headset | Oculus, Adresse: https://www.oculus.com/go/?locale=de_DE (besucht am 07.06.2019).
- [105] Facebook. (2019). Oculus Quest | Oculus, Adresse: <https://www.oculus.com/quest/> (besucht am 07.06.2019).

-
- [107] Fat Shark. (2019). Attitude V5 FPV Drone Racing Goggles - FSV1049, Adresse: <https://www.fatshark.com/product/attitude-v5/> (besucht am 20.08.2019).
- [108] Fat Shark. (2019). SCOUT FPV Drone Racing Goggles - FSV1132, Adresse: <https://www.fatshark.com/product/scout/> (besucht am 20.08.2019).
- [109] Feel Three. (2019). Feel Three | The Virtual Reality Motion Simulator, Adresse: <https://www.feelthree.com/> (besucht am 21.08.2019).
- [110] Feelreal Inc. (2019). Feelreal - The World's First Multisensory VR Mask, Adresse: <https://www.indiegogo.com/projects/2498405> (besucht am 28.05.2019).
- [112] K. J. Fernandes, V. Raja und J. Eyre, "Cybersphere: The fully immersive spherical projection system", *Communications of the ACM*, Jg. 46, Nr. 9, S. 141, 1. Sep. 2003, ISSN: 00010782. DOI: 10.1145/903893.903929. Adresse: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=903893.903929> (besucht am 05.09.2019).
- [116] Google. (2017). Glass, Adresse: <https://www.google.com/glass/start/> (besucht am 16.08.2019).
- [117] Google. (2018). Daydream – Daydream View, Adresse: https://vr.google.com/intl/de_de/daydream/smartphonevr (besucht am 07.06.2019).
- [118] Google. (2019). Google Cardboard – Google VR, Adresse: <https://vr.google.com/cardboard/> (besucht am 16.08.2019).
- [120] Gotouchvr. (2017). Virtual Haptics Training | France, Adresse: <https://www.gotouchvr.com> (besucht am 20.08.2019).
- [128] H. Haftmann. (21. Jan. 2011). FlyStick — Umbau, Neubau, Neukonstruktion, Adresse: <https://www-user.tu-chemnitz.de/~heha/mb-iwp/FlyStick/> (besucht am 13.11.2019).
- [133] Harman/Kardon. (2018). Enchant 800 | All-in-One Soundbar Mit 8 Kanälen Und MultiBeam™ Surround Sound, Adresse: https://www.harmankardon.de/soundbars/ENCHANT+800.html?cgid=soundbars&dwvar_ENCHANT%20800_color=Graphite-EMEA-Current#start=1 (besucht am 20.08.2019).
- [142] Holosuit. (2019). HoloSuit, Adresse: <https://www.holosuit.com/home> (besucht am 20.08.2019).
- [147] Igi. (2016). CAVE System | CAVE Automatic Virtual Environment, Adresse: <https://www.werigi.com/cave> (besucht am 16.08.2019).
- [148] Igi. (2016). PowerWall AV System | PowerWall Projection System, Adresse: <https://www.werigi.com/powerwall> (besucht am 16.08.2019).
- [149] Infinadeck. (2018). Infinadeck | The only true VR omnidirectional treadmill, Adresse: <https://www.infinadeck.com/> (besucht am 21.08.2019).
- [155] KatVR. (2019). KATVR - Walk into Virtual Reality, Adresse: <https://katvr.com/> (besucht am 21.08.2019).
- [162] R. Kirichik. (2017). OhRoma - The Smell of Virtual Reality Sex, Adresse: <https://www.camsoda.com/products/ohroma/> (besucht am 20.08.2019).

-
- [171] C. E. Lathan. (2016). NuGlove Projects, Adresse: <https://www.anthrotronix.com/nuglove-projects/> (besucht am 13.08.2019).
- [178] Lenovo. (2018). Lenovo Explorer | VR-Headset für Windows Mixed Reality | Lenovo Deutschland, Adresse: <https://www.lenovo.com/de/de/smart-devices/virtual-reality/lenovo-explorer/Lenovo-Explorer/p/G10NREAG0A2> (besucht am 07.06.2019).
- [179] Lenovo. (2019). Mirage Solo with Daydream | Eigenständiges VR-Headset | Lenovo Deutschland, Adresse: <https://www.lenovo.com/de/de/smart-devices/virtual-reality/lenovo-mirage-solo/Mirage-Solo/p/ZZIRZRHVR01> (besucht am 07.06.2019).
- [181] LG. (2018). LG 5.1 3D Blu-ray Heimkinosystem, 1000W, kabellose Rear Surround Lautsprecher | LG Deutschland, Adresse: <https://www.lg.com/de/audio/lg-LHB655NW> (besucht am 20.08.2019).
- [182] LG. (2019). LG SL10YG | 5.1.2 Soundbar mit Dolby Atmos® | Subwoofer | LG Deutschland, Adresse: <https://www.lg.com/de/audio/lg-SL10YG> (besucht am 20.08.2019).
- [184] Y.-Y. Liao, Y.-F. Hong, P.-H. Han und J.-C. Ko, director, *LiquidMask*, Taipei, Taiwan, 29. Apr. 2019. Adresse: https://www.youtube.com/watch?v=44_J-n5R2NA (besucht am 30.10.2019).
- [185] Logitech. (2019). Logitech G433 7.1 Surround Sound Gaming-Headset, Adresse: <https://www.logitechg.com/de-de/products/gaming-audio/g433-7-1-surround-sound-gaming-headset.html> (besucht am 20.08.2019).
- [186] Logitech. (2019). Logitech G560 PC-Gaming-Lautsprecher mit spielbasierter RGB-Beleuchtung, Adresse: <https://www.logitechg.com/de-de/products/gaming-audio/g560-rgb-gaming-speakers.html> (besucht am 20.08.2019).
- [187] Logitech. (2019). Logitech G633 Artemis Spectrum – Kabelgebundenes Gaming-Headset mit 7.1 Surround Sound – de-DE, Adresse: <https://www.logitechg.com/de-de/products/gaming-audio/g633-7-1-surround-sound-gaming-headset.html> (besucht am 20.08.2019).
- [188] Logitech. (2019). Logitech Z906 Home Theater 5.1 Surround Sound System, Adresse: <https://www.logitech.com/de-de/product/speaker-system-z906> (besucht am 20.08.2019).
- [191] Magic Leap Inc. (2018). Magic Leap One: Creator Edition | Magic Leap, Adresse: <https://www.magicleap.com/magic-leap-one> (besucht am 16.08.2019).
- [193] Manus VR. (2018). Prime One Gloves, Adresse: <https://manus-vr.com/prime-one-gloves/> (besucht am 20.08.2019).
- [194] Manus VR. (2018). Prime Xsens Gloves, Adresse: <https://manus-vr.com/prime-xsens-gloves/> (besucht am 20.08.2019).
- [195] Manus VR. (2019). Prime Haptic Gloves, Adresse: <https://manus-vr.com/prime-haptic-gloves/> (besucht am 20.08.2019).
- [199] H. Matsukura, T. Yoneda und H. Ishida, “Smelling Screen: Development and Evaluation of an Olfactory Display System for Presenting a Virtual Odor Source”, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Jg. 19, Nr. 4, S. 606–615, Apr. 2013, ISSN: 1077-2626. DOI: 10.1109/TVCG.2013.40. Adresse: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6479189/> (besucht am 30.08.2019).

-
- [200] D. Maynes-Aminzade, “Edible Bits: Seamless Interfaces between People, Data and Food”, S. 4, 2005.
- [201] R. McCarthy, “Scent-Emitting Systems”, Pat. 4 603 030, 29. Juli 1986. Adresse: <https://patentimages.storage.googleapis.com/b3/93/dc/88b81b0ba5937c/US4603030.pdf>.
- [206] MicroScent LLC. (2004). MicroScent - the Most Effective Scent Generator Ever!, Adresse: <http://www.micro-scent.net/> (besucht am 05.09.2019).
- [207] Microsoft, *Microsoft HoloLens Technisches Datenblatt*, 2016. Adresse: <https://www.bechtle.com/shop/medias/5a1430f79ce96955066d0b10.pdf> (besucht am 26.06.2019).
- [208] Microsoft. (2019). HoloLens 2 – Preise und Optionen | Microsoft HoloLens, Adresse: <https://www.microsoft.com/de-de/hololens/buy> (besucht am 16.08.2019).
- [213] F. Nakaizumi, H. Noma, K. Hosaka und Y. Yanagida, “SpotScents: A Novel Method of Natural Scent Delivery Using Multiple Scent Projectors”, in *IEEE Virtual Reality Conference (VR 2006)*, März 2006, S. 207–214. DOI: 10.1109/VR.2006.122.
- [214] T. Nakamoto, S. Otaguro, M. Kinoshita, M. Nagahama, K. Ohinishi und T. Ishida, “Cooking Up an Interactive Olfactory Game Display”, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Jg. 28, Nr. 1, S. 75–78, Jan. 2008, ISSN: 0272-1716. DOI: 10.1109/MCG.2008.3. Adresse: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4418754/> (besucht am 30.08.2019).
- [216] T. Narumi, T. Kajinami, S. Nishizaka, T. Tanikawa und M. Hirose, “Pseudo-gustatory display system based on cross-modal integration of vision, olfaction and gustation”, in *2011 IEEE Virtual Reality Conference*, Singapore, Singapore: IEEE, März 2011, S. 127–130, ISBN: 978-1-4577-0039-2. DOI: 10.1109/VR.2011.5759450. Adresse: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5759450/> (besucht am 08.07.2019).
- [219] NoitomHi5. (2018). Home | Hi5 VR Glove, Adresse: <https://hi5vrglove.com/> (besucht am 20.08.2019).
- [221] North Inc. (2019). Explore Focals - North, Adresse: <https://www.bynorth.com/focals> (besucht am 09.10.2019).
- [222] NVIS. (2019). Nvisinc - Products, Adresse: <https://www.nvisinc.com/product/products.html?layout=product&fid=a0QG0000009NGz7MAG> (besucht am 13.11.2019).
- [223] Olorama Tech. (2019). Olorama Technology Ltd. – Professional scent generator, Adresse: <https://www.olorama.com/> (besucht am 20.08.2019).
- [224] Omnifinity. (2019). Omnifinity - Omnideck, Adresse: <http://omnifinity.se/> (besucht am 21.08.2019).
- [225] Onkyo. (2016). Onkyo | HT-S7805, Adresse: <http://www.de.onkyo.com/de/produkte/ht-s7805-130981.html> (besucht am 20.08.2019).
- [226] Onkyo, “HT-S9800THX 7.1-Kanal-AV-Netzwerk-Receiver mit Lautsprechern”, 2017.
- [231] L.-A. Pessina, “Artificial skin could help rehabilitation and enhance virtual reality”, 27. Sep. 2019. Adresse: <https://actu.epfl.ch/news/artificial-skin-could-help-rehabilitation-and-ehna/> (besucht am 30.10.2019).

-
- [232] Pico. (2019). Pico G2 4K | VR Goes 4K | All-In-One VR Headset, Adresse: https://www.pico-interactive.com/us/G2_4K.html (besucht am 08.01.2020).
- [233] Pico. (2020). Pico-Interactive | Best-in-Class Design. Built with Enterprise in Mind., Adresse: <https://www.pico-interactive.com/us/index.html> (besucht am 08.01.2020).
- [234] Pimax. (2018). Pimax 5K Plus VR Headset, Adresse: <https://pimaxvr.com/products/5kplus> (besucht am 07.06.2019).
- [235] Pimax. (2018). Pimax 5K XR, Adresse: <https://pimaxvr.com/products/xr> (besucht am 07.06.2019).
- [236] Pimax. (2018). Pimax 8K VR Headset, Adresse: <https://pimaxvr.com/products/8k> (besucht am 07.06.2019).
- [237] Pioneer. (2016). HTP-206 | Pioneer, Adresse: <https://www.pioneer-audiovisual.eu/de/produkte/htp-206> (besucht am 20.08.2019).
- [238] Plexus Immersive Corp. (2018). Plexus / High-performance VR/AR Gloves, Adresse: <http://plexus.im/index.html> (besucht am 20.08.2019).
- [239] PVR. (2019). PVR IRIS Standalone All-in-one VR Headset For Adult, Adresse: <https://pvrmall.com/products/pvr-iris-standalone-adult-vr-headset> (besucht am 20.08.2019).
- [240] N. Ranasinghe, A. D. Cheok, O. N. N. Fernando, H. Nii und G. Ponnampalam, "Electronic taste stimulation", in *Proceedings of the 13th International Conference on Ubiquitous Computing - UbiComp '11*, Beijing, China: ACM Press, 2011, S. 561, ISBN: 978-1-4503-0630-0. DOI: 10.1145/2030112.2030213. Adresse: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2030112.2030213> (besucht am 20.08.2019).
- [241] N. Ranasinghe, R. Nakatsu, H. Nii und P. Gopalakrishnakone, "Tongue Mounted Interface for Digitally Actuating the Sense of Taste", in *2012 16th International Symposium on Wearable Computers*, Newcastle, United Kingdom: IEEE, Juni 2012, S. 80–87, ISBN: 978-1-4673-1583-8. DOI: 10.1109/ISWC.2012.16. Adresse: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6246147/> (besucht am 20.08.2019).
- [245] Rescuetec. (2014). Brandgeruch Spray Im Feuerwehrshop Für Feuerwehrbedarf Kaufen | Rescue-Tec, Adresse: <https://www.rescue-tec.de/Brandgeruch-Spray.html> (besucht am 20.08.2019).
- [248] L. Rosson. (12. Juni 2014). The Virtual Interface Environment Workstation (VIEW), 1990 | NASA, Adresse: https://www.nasa.gov/ames/spinoff/new_continent_of_ideas/ (besucht am 05.08.2019).
- [249] Roto. (2019). Discover Immersion | Roto VR Chair the 360 seat for Oculus Rift, HTC Vive and Samsung Gear, Adresse: <https://www.rotovr.com/discover-immersion> (besucht am 21.08.2019).
- [254] Samsung. (2019). Samsung Odyssey | Samsung, Adresse: <http://www.samsung.com/us/computing/computing-accessories/computers/xe800zaa-hcl-us-xe800zaa-hcl-us/> (besucht am 07.06.2019).

-
- [255] ScentAir. (2019). Scent Marketing Systems | ScentAir, Adresse: <https://www.scentair.com/why-scentair/solutions/> (besucht am 06.09.2019).
- [256] Scentee. (2011). Scentee Machina | Smartest AI Room Diffuser in the Globe., Adresse: <https://scentee.com> (besucht am 20.08.2019).
- [258] Schenker. (2019). META 2 - Exklusives Augmented Reality Development Kit, Adresse: <https://www.schenker-tech.de/meta-2/> (besucht am 16.08.2019).
- [264] S. A. Seah, D. Martinez Plasencia, P. D. Bennett, A. Karnik, V. S. Otrocol, J. Knibbe, A. Cockburn und S. Subramanian, "SensaBubble: A chrono-sensory mid-air display of sight and smell", in *Proceedings of the 32nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '14*, Toronto, Ontario, Canada: ACM Press, 2014, S. 2863–2872, ISBN: 978-1-4503-2473-1. DOI: 10.1145/2556288.2557087. Adresse: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2556288.2557087> (besucht am 15.08.2019).
- [265] Sennheiser. (2017). Sennheiser IE 800 S - In Ear Kopfhörer Ohrhörer High End, Adresse: <https://de-de.sennheiser.com/in-ear-kopfhoerer-ohrhoerer-ie-800-s-keramik> (besucht am 20.08.2019).
- [266] Sennheiser. (2017). Sennheiser PC 323D - PC Gaming Headset mit 7.1-Kanal-Surround-Sound, Adresse: <https://de-de.sennheiser.com/gaming-headset-stereo-dolby-kopfhoerer-pc-323d> (besucht am 20.08.2019).
- [267] Sennheiser. (2018). Sennheiser HD 820 - High-End Kopfhörer Für Audiophile, Adresse: <https://de-de.sennheiser.com/high-end-kopfhoerer-audiophile-hd-820> (besucht am 20.08.2019).
- [268] Sennheiser. (2018). Sennheiser PXC 550 TRAVEL - Wireless Kopfhörer Headset Bluetooth® - Active Noise cancelling, Adresse: <https://de-de.sennheiser.com/wireless-kopfhoerer-headset-bluetooth-noise-cancelling-pxc-550-travel> (besucht am 20.08.2019).
- [269] Sennheiser. (2019). Sennheiser AMBEO Soundbar, Adresse: <https://de-de.sennheiser.com/ambeco-soundbar> (besucht am 20.08.2019).
- [270] Sennheiser. (2019). Sennheiser MOMENTUM True Wireless - - Die Exquisiten Bluetooth-Ohrkanal-Kopfhörer, Adresse: <https://de-de.sennheiser.com/truewireless-details> (besucht am 20.08.2019).
- [271] Senso. (2018). Senso | Senso Glove | Senso Suit - Probably the Best Controller for Virtual and Augmented Reality, Adresse: <https://senso.me/> (besucht am 20.08.2019).
- [272] Sensoryx AG. (2017). Sensoryx, Adresse: <http://www.sensoryx.com/> (besucht am 20.08.2019).
- [277] Hi-Shock. (2019). Hi-SHOCK | Premium 3D Brillen für TV & Beamer günstig kaufen, Adresse: <https://www.hi-shock.de/virtual-reality-geschenkset-vr-brille-mit-bluetooth-gamepad-etui> (besucht am 20.08.2019).
- [278] Hi-Shock. (2019). Hi-SHOCK | Premium 3D Brillen für TV & Beamer günstig kaufen, Adresse: <https://www.hi-shock.de/vr-shark-x6-vr-headset-fuer-4-7-6-2-smartphones-bluetooth> (besucht am 20.08.2019).

-
- [279] Hi-Shock. (2019). Hi-SHOCK | Premium 3D Brillen für TV & Beamer günstig kaufen, Adresse: <https://www.hi-shock.de/vr-shark-x4-lite-virtual-reality-headset> (besucht am 20.08.2019).
- [280] Sixense Enterprise. (2019). Hardware — Sixense — next-level VR/AR motion tracking, Adresse: <https://www.sixense.com/platform/hardware/> (besucht am 10.09.2019).
- [283] Sony. (2016). PlayStation®VR, Adresse: <https://www.playstation.com/de-de/explore/playstation-vr/> (besucht am 16.08.2019).
- [284] Sony. (2018). Sony 3.1-Kanal-Soundbar mit Dolby Atmos®, Adresse: <https://www.sony.de/electronics/sound-bars/ht-zf9> (besucht am 20.08.2019).
- [285] Sony. (2018). Sony 7.1.2 Dolby Atmos Soundbar, Adresse: <https://www.sony.de/electronics/sound-bars/ht-st5000> (besucht am 20.08.2019).
- [286] Sony. (2019). HMZ-T1 | Sony DE, Adresse: <https://www.sony.de/electronics/support/televisions-projectors-personal-3d-viewer/hmz-t1/specifications> (besucht am 20.08.2019).
- [287] Sony. (2019). HMZ-T2 | Sony DE, Adresse: <https://www.sony.de/electronics/support/televisions-projectors-personal-3d-viewer/hmz-t2/specifications> (besucht am 20.08.2019).
- [288] Sony. (2019). HMZ-T3W | Sony DE, Adresse: <https://www.sony.de/electronics/support/televisions-projectors-personal-3d-viewer/hmz-t3w/specifications> (besucht am 20.08.2019).
- [299] TangIO. (2019). etee – TG0, Adresse: <https://tg0.co.uk/etee/> (besucht am 08.01.2020).
- [301] C. Taylor. (2018). VRgluv | Force Feedback Haptic Gloves for VR Training, Adresse: <https://www.vrgluv.com/#technology> (besucht am 20.08.2019).
- [302] Teslasuit. (2019). Teslasuit - full body haptic suit, Adresse: <https://teslasuit.io/> (besucht am 28.05.2019).
- [303] Teufel. (2019). Cinesystem Trios "5.1-Set L Teufel, Adresse: <https://www.teufel.de/heimkino/cinesystem-trios-5-1-set-l-p16270.html> (besucht am 20.08.2019).
- [304] Teufel. (20. Aug. 2019). MOVE PRO | Teufel, Adresse: https://www.teufelaudio.at/kopfhoerer/move-pro-p16063.html?var=16064&partner_id=ps-at.billiger.Kopfh%C3%B6rer.105288001&et_uk=c0ce414f059648daa2aaf8b224a537c5 (besucht am 20.08.2019).
- [305] Teufel. (12. Aug. 2019). System 6 AVR für Dolby Atmos "5.1.2-Set Teufel, Adresse: <https://www.teufel.de/heimkino/system-6-avr-fuer-dolby-atmos-5-1-2-set-p18417.html> (besucht am 20.08.2019).
- [306] The Right Cup. (2018). The Right Cup, Adresse: <https://www.therightcup.com/> (besucht am 20.08.2019).
- [309] Transfinity. (2019). VR Motion Simulators, Adresse: <https://www.transfinityvr.com/vr-motion-simulators> (besucht am 21.08.2019).

-
- [310] Ubisoft. (2016). NOSULUS RIFT, Adresse: <http://nosulusrift.ubi.com/> (besucht am 20.08.2019).
- [311] Ultrahaptics. (2010). Leap Motion, Adresse: <https://www.leapmotion.com/> (besucht am 20.08.2019).
- [312] Ultrahaptics. (2018). Ultrahaptics - Discover a new type of haptics, Adresse: <https://www.ultrahaptics.com/products-programs/stratos-inspire/> (besucht am 20.08.2019).
- [314] Valve. (16. Okt. 2019). Valve Index, Adresse: <https://www.valvesoftware.com/de/index> (besucht am 16.10.2019).
- [315] VAQSO Inc. (2019). VAQSO VR | Adding a 4th sense to VR worlds, Adresse: <https://vaqso.com/> (besucht am 20.08.2019).
- [316] S. Varga. (2019). HaptX | Haptic gloves for VR training, simulation, and design, Adresse: <https://haptx.com/> (besucht am 28.05.2019).
- [317] Varjo. (2018). Varjo VR-1, Adresse: <https://store.varjo.com/Varjo-VR-1> (besucht am 16.08.2019).
- [318] Varjo. (2019). XR-1, Adresse: <https://varjo.com/xr-1/> (besucht am 16.08.2019).
- [322] Virtuix. (2017). Virtuix Omni™ | Omni by Virtuix, Adresse: <https://www.virtuix.com/product/virtuix-omni/> (besucht am 21.08.2019).
- [323] Virtusphere Inc. (2013). Virtusphere Home Page, Adresse: <http://www.virtusphere.com/index.html> (besucht am 05.09.2019).
- [325] Visbox Inc. (2016). Visbox, Inc. | Display Walls, Adresse: <http://www.visbox.com/products/tiled/>, %20<http://www.visbox.com/products/tiled/> (besucht am 16.08.2019).
- [326] Visbox Inc. (2016). Visbox, Inc. | VisCube C4, Adresse: <http://www.visbox.com/products/cave/viscube-c4/>, %20<http://www.visbox.com/products/cave/viscube-c4/> (besucht am 16.08.2019).
- [327] Visbox Inc. (2016). Visbox, Inc. | VisCube M4, Adresse: <http://www.visbox.com/products/cave/viscube-m4/>, %20<http://www.visbox.com/products/cave/viscube-m4/> (besucht am 16.08.2019).
- [328] Viscon. (2017). LED-Wand: LED-Wand-Lösungen von Viscon | Viscon, Adresse: <https://viscon.de/vr/led-wand/> (besucht am 16.08.2019).
- [329] Viscon. (2017). Virtual Reality | Powerwall | Viscon, Adresse: <https://viscon.de/vr/vr-wall/> (besucht am 16.08.2019).
- [330] Viscon. (2017). Virtual Reality | VR Bench | Viscon, Adresse: <https://viscon.de/vr/vr-bench/> (besucht am 16.08.2019).
- [331] Viscon. (2017). Virtual Reality | VR Cave | Viscon, Adresse: <https://viscon.de/vr/vr-cave/> (besucht am 16.08.2019).
- [332] Viscon. (2017). Virtual Reality | VR Dome | Viscon, Adresse: <https://viscon.de/vr/vr-dome/> (besucht am 16.08.2019).

-
- [333] Visospace. (2019). Visospace - unlock full immersion in VR, Adresse: <https://www.viso.space> (besucht am 21.08.2019).
- [336] VRgluv. (2019). VRgluv - Force Feedback Gloves for VR Training, Adresse: <https://www.vrgluv.com/#technology> (besucht am 28.05.2019).
- [337] Vuzix. (2018). Vuzix Blade® | Augment Reality (AR) Smart Glasses for the Consumer, Adresse: <https://www.vuzix.com/products/blade-smart-glasses> (besucht am 16.08.2019).
- [338] WalkOVR. (2019). WalkOVR - Ändern Sie die Art und Weise, wie Sie in VR spielen, Adresse: <https://de.walkovr.com/> (besucht am 21.08.2019).
- [349] Xsens. (2018). Xsens MVN Animate - Products, Adresse: <https://www.xsens.com/products/xsens-mvn-animate/> (besucht am 20.08.2019).
- [350] Xtrematic. (2019). Xtrematic, Adresse: <https://xtrematic.com> (besucht am 21.08.2019).
- [351] T. Yamada, S. Yokoyama, T. Tanikawa, K. Hirota und M. Hirose, "Wearable Olfactory Display: Using Odor in Outdoor Environment", in *IEEE Virtual Reality Conference (VR 2006)*, Alexandria, VA, USA: IEEE, 2006, S. 199–206, ISBN: 978-1-4244-0224-3. DOI: 10.1109/VR.2006.147. Adresse: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1667645/> (besucht am 13.08.2019).
- [352] Yamaha. (2017). YHT-1840 - Übersicht - Yamaha - Deutschland, Adresse: https://de.yamaha.com/de/products/audio_visual/home_theater_systems/yht-1840/index.html (besucht am 20.08.2019).
- [353] Yamaha. (2019). YHT-2950-EU - Technische Daten, Adresse: https://de.yamaha.com/de/products/audio_visual/home_theater_systems/yht-2950-eu/specs.html (besucht am 20.08.2019).
- [354] Y. Yanagida, H. Noma, N. Tetsutani und A. Tomono, "An unencumbering, localized olfactory display", in *CHI '03 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems - CHI '03*, Ft. Lauderdale, Florida, USA: ACM Press, 2003, S. 988, ISBN: 978-1-58113-637-1. DOI: 10.1145/765891.766109. Adresse: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=765891.766109> (besucht am 13.08.2019).
- [355] Yaw. (2019). Yawvr, Adresse: <https://www.yawvr.com> (besucht am 21.08.2019).
- [359] Zeiss. (2019). ZEISS Virtual Reality, Adresse: <https://www.zeiss.de/virtual-reality/home.html> (besucht am 20.08.2019).

A Anhang

A.1 Hardwarekomponenten zur Bespielung der Sinne

A.1.1 Visuelle Displays

Tabelle A-1: Visuelle Displays in der Digitalen Realität

Nr.	Hersteller - Produkt	Displaytyp	DOF []	Sichtfeld [°]	Auflösung [Pixel]	Bildrate [Hz]	Erhältlich Kosten [€]
			- FOV [%]				
1	Acer - AH101 ^[6]	HMD (MR)	6 - 61	100	2880 x 1440	90	✓ 349
2	Asus - HC102 ^[15]	HMD (MR)	6 - 59	95	2880 x 1440	90	✓ 429
3	Dji - Dji Goggles ^[79]	HMD (2D/3D)	3 - 56	85	3840 x 1080	60	✓ 399
4	Eden - Snacker ^[85]	HMD (VR)	3 - 32	105	3840 x 2160	72	✓ n.a.
5	Epson - BT2000 ^[96]	HMD (AR)	6 - 14	23	960 x 540	60	✓ 1.964
6	Epson - BT300 ^[95]	HMD (AR)	6 - 14	23	1280 x 720	30	✓ 669
7	Epson - BT200 ^[94]	HMD (AR)	6 - 14	23	960 x 540	60	✓ 699
8	EST - nVisor ST50 ^[98]	HMD (AR)	6 - 19	40	1280 x 1024	60	✓ n.a.
9	Fat Shark - Scout ^[108]	HMD (2D/3D)	3 - 8	50	1136 x 640	n.a.	✓ 180
10	Fat Shark - Attitude V5 ^[107]	HMD (2D/3D)	3 - 7	30	640 x 400	n.a.	✓ 271
11	Google - Glass Enterprise ^[116]	HMD (AR)	6 - **	n.a.	640 x 360	n.a.	✓ 2.500
12	Google - Glass ^[116]	HMD (AR)	6 - **	n.a.	n.a.	n.a.	✓ 4.549
13	Google - Daydream ^[117]	HMD (VR)	4 - **	*	*	*	✓ 109

Tabelle A-1: Visuelle Displays in der Digitalen Realität

Nr.	Hersteller - Produkt	Displaytyp	DOF []	Sichtfeld	Auflösung	Bildrate	Erhältlich
			- FOV [%]	[°]	[Pixel]	[Hz]	Kosten [€]
14	Google - Cardboard ^[118]	HMD (VR)	3 - **	*	*	*	✓ 13
15	Hi-Shock - X4 ^[277]	HMD (VR)	3 - **	*	*	*	✓ 55
16	Hi-Shock - X6 ^[278]	HMD (VR)	3 - **	*	*	*	✓ 48
17	Hi-Shock - X4 Lite ^[279]	HMD (VR)	3 - **	*	*	*	✓ 34
18	HP - Reverb ^[62]	HMD (MR)	6 - 67	114	2160 x 2160	90	✓ 739
19	HTC - Vive ^[63]	HMD (MR)	6 - 67	110	2160 x 1200	90	✓ 599
20	HTC - Vive Pro ^[64]	HMD (MR)	6 - 67	110	2880 x 1600	90	✓ 1.399
21	HTC - Vive Focus ^[66]	HMD (MR)	6 - 67	110	2880 x 1600	75	✓ 699
22	HTC - Vive Cosmos ^[65]	HMD (MR)	6 - 67	110	2880 x 1700	n.a.	✓ 799
23	Lenovo - Mirage Solo ^[179]	HMD (VR)	4 - 67	110	2560 x 1440	75	✓ 399
24	Lenovo - Explorer ^[178]	HMD (VR)	6 - 67	110	2880 x 1440	90	✓ 429
25	Magic Leap - Magic Leap One ^[191]	HMD (AR)	6 - 30	50	n.a.	n.a.	✓ 2.060
26	Microsoft - Hololens 2 ^[208]	HMD (AR)	6 - 32	52	1920 x 1080	n.a.	✓ 3.139
27	Microsoft - Hololens ^[207]	HMD (AR)	6 - 18	30	1920 x 1080	n.a.	✓ 4.036
28	NASA - EyePhone ^[248]	HMD (VR)	3 - **	n.a.	n.a.	n.a.	x 2.073
29	North - Focals ^[221]	HMD (2D)	0 - **	n.a.	n.a.	n.a.	✓ 545
30	NVIS - nVisor MH60 ^[222]	HMD (AR)	6 - 24	43,6	1280 x 1024	60	✓ 21.710
31	Oculus - Go ^[104]	HMD (VR)	4 - 36	60	2560 x 1440	72	✓ 269
32	Oculus - Gear VR ^[101]	HMD (VR)	3 - **	n.a.	*	*	✓ 120
33	Oculus - Rift S ^[103]	HMD (VR)	6 - **	n.a.	1280 x 1440	80	✓ 449
34	Oculus - Rift ^[102]	HMD (VR)	6 - 61	100	2160 x 1200	90	✓ 499
35	Oculus - Quest ^[105]	HMD (VR)	6 - **	n.a.	3200 x 1440	72	✓ 549
36	Pico - Neo 2 ^[233]	HMD (VR)	6 - 31	101	4096 x 2160	75	✓ 807
37	Pico - G2 ^[232]	HMD (VR)	3 - **	n.a.	4096 x 2160	75	✓ n.a.
38	Pimax - 8k ^[236]	HMD (VR)	6 - 94	200	7680 X 2160	80	✓ 806

Tabelle A-1: Visuelle Displays in der Digitalen Realität

Nr.	Hersteller - Produkt	Displaytyp	DOF [] - FOV [%]	Sichtfeld [°]	Auflösung [Pixel]	Bildrate [Hz]	Erhältlich Kosten [€]
39	Pimax - 5k XR ^[235]	HMD (VR)	6 - 94	200	5120 x 1440	85	✓ 806
40	Pimax - 5k Plus ^[234]	HMD (VR)	6 - 94	200	5120 x 1440	90	✓ 627
41	Pvr - Iris ^[239]	HMD (2D/3D)	3 - 9	101	2560 x 1440	n.a.	✓ 180
42	Samsung - Odyssey ^[254]	HMD (VR)	6 - 67	110	1440 x 1600	90	✓ 790
43	Samsung - Odyssey+ ^[254]	HMD (VR)	6 - 67	110	1440 x 1600	90	✓ 447
44	Samsung - Gear VR ^[101]	HMD (VR)	3 - 61	101	*	*	✓ 100
45	Schenker - Meta 2 ^[258]	HMD (AR)	6 - 55	90	2560 x 1440	75	✓ 1.779
46	Sony - HMZ-T3W ^[288]	HMD (3D)	0 - 5	45	1280 x 720	n.a.	✓ 1.798
47	Sony - HMZ-T1 ^[286]	HMD (2D/3D)	0 - 5	45	1280 x 720	n.a.	✓ 1.098
48	Sony - HMZ-T2 ^[287]	HMD (2D/3D)	0 - 5	45	1280 x 720	n.a.	✓ 998
49	Sony - Playstation VR ^[283]	HMD (VR)	6 - 10	100	1920 x 1080	90	✓ 170
50	Valve - Index ^[314]	HMD (VR)	6 - 70	130	2880 x 1600	120	✓ 1.079
51	Varjo - XR-1 ^[318]	HMD (MR)	6 - 50	82	1920 x 1080	90	x n.a.
52	Varjo - VR-1 ^[317]	HMD (VR)	6 - 53	87	1920 x 1080	90	✓ 5.995
53	Varjo - VR-2 ^[318]	HMD (VR)	6 - 53	87	1920 x 1080	100	✓ 5.995
54	Visbox - VisCube C4-4K ^[325]	WFD (VR)	6 - 67	200	4096 x 2160	n.a.	✓ n.a.
55	Visbox - VisCube C4-T2 ^[325]	WFD (VR)	6 - 58	200	2840 x 2560	n.a.	✓ n.a.
56	Visbox - VisCube C4-T3 ^[325]	WFD (VR)	6 - 67	200	4096 x 2560	n.a.	✓ n.a.
57	Visbox - VisCube C4-T3X ^[325]	WFD (VR)	6 - 67	200	6000 x 4096	n.a.	✓ n.a.
58	Visbox - VisWall 4K ^[325]	WFD (VR)	6 - 17	200	4096 x 2160	n.a.	✓ n.a.
59	Visbox - VisWall T3 ^[325]	WFD (VR)	6 - 17	200	4096 x 2560	n.a.	✓ n.a.
60	Visbox - VisWall T4 ^[325]	WFD (VR)	6 - 17	200	4600 x 2875	n.a.	✓ n.a.
61	Visbox - VisWall-LCD 4HD ^[325]	WFD (VR)	6 - 17	200	1920 x 1080	n.a.	✓ n.a.
62	Visbox - VisWall-LCD 6UHD ^[325]	WFD (VR)	6 - 17	200	3480 x 2160	n.a.	✓ n.a.
63	Visbox - VisCube M4 ^[327]	WFD (VR)	6 - 67	200	2560 x 1600	n.a.	✓ n.a.

Tabelle A-1: Visuelle Displays in der Digitalen Realität

Nr.	Hersteller - Produkt	Displaytyp	DOF []	Sichtfeld	Auflösung	Bildrate	Erhältlich
			- FOV [%]	[°]	[Pixel]	[Hz]	Kosten [€]
64	Visbox - VisCube C4 ^[326]	WFD (VR)	6 - 58	200	2560 x 1600	n.a.	✓ n.a.
65	Viscon - LED-Wand ^[328]	WFD (2D/3D)	6 - 17	200	3840 x 2160	n.a.	✓ n.a.
66	Viscon - Powerwall ^[329]	WFD (3D-Stereo)	6 - 17	200	n.a.	n.a.	✓ n.a.
67	Viscon - Dome ^[332]	WFD (VR)	6 - 17	200	n.a.	n.a.	✓ n.a.
68	Viscon - Cave ^[331]	WFD (VR)	6 - 67	200	n.a.	n.a.	✓ n.a.
69	Viscon - Bench ^[330]	WFD (VR)	6 - 33	200	n.a.	n.a.	✓ n.a.
70	Vuzix - Vuzix Blade ^[337]	HMD (AR)	6 - **	n.a.	n.a.	n.a.	✓ 665
71	Werigi - Powerwall ^[148]	WFD (3D-Stereo)	6 - 17	200	4096 x 2160	n.a.	✓ n.a.
72	Werigi - Cave ^[147]	WFD (VR)	6 - 58	200	4096 x 2160	n.a.	✓ n.a.
73	Zeiss - VR One Plus ^[359]	HMD (VR)	3 - **	*	*	*	✓ 24
74	Zeiss - Cinemizer OLED ^[61]	HMD (2D/3D)	0 - 3	30	1740 x 500	60	✓ 649

Hinweis: * : abhängig des eingelegten Smartphones
 ** : nicht ermittelbar
 ✓ : als Produkt erhältlich
 x : nicht als Produkt erhältlich
 n.a. : nicht angegeben
 Auflösung : Gesamtwert $\hat{=}$ Werte beider Augen zusammen
 Kosten : gerundete Werte

A.1.2 Auditive Displays

Tabelle A-2: Auditive Displays in der Digitalen Realität

Nr.	Hersteller - Produkt	Displaytyp (geeignet für Digitale Realität (DR))	DOF [] - FOR [%]	Art	Erhältlich Kosten [€]
1	Beyerdynamic - T5P ^[26]	HMD (DR)	6 - 100	OverEar	✓ 999
2	Beyerdynamic - Quincy ^[24]	WFD (DR)	6 - 100	OverEar	✓ 2.050
3	Beyerdynamic - MMX 300 ^[25]	HMD (DR)	6 - 100	OverEar	✓ 299
4	Bose - Surround Speaker 700 ^[35]	WFD (DR)	5 - 83	Lautsprecher	✓ 900
5	Bose - Headphones 700 ^[36]	HMD (DR)	6 - 100	OverEar	✓ 400
6	Harman Kardon - Enchant 800 ^[133]	WFD (DR)	5 - 83	Lautsprecher	✓ 699
7	Hi-Shock - X6 ^[278]	HMD (VR)	6 - 100	OverEar	✓ 48 (*)
8	HTC - Vive Pro ^[64]	HMD (MR)	6 - 100	OverEar	✓ 1.399 (*)
9	LG - SL10YG ^[182]	WFD (DR)	6 - 100	Lautsprecher	✓ 1.119
10	LG - LHB655NW ^[181]	WFD (DR)	6 - 100	Lautsprecher	✓ 405
11	Logitech - G633 ^[187]	HMD (DR)	6 - 100	OverEar	✓ 169
12	Logitech - G560 ^[186]	WFD (DR)	6 - 100	Lautsprecher	✓ 249
13	Logitech - G433 ^[185]	HMD (DR)	6 - 100	OverEar	✓ 129
14	Logitech - Z906 ^[188]	WFD (DR)	6 - 100	Lautsprecher	✓ 399
15	Oculus - Rift ^[102]	HMD (VR)	6 - 100	OverEar	✓ 499 (*)
16	Onkyo - HT-S9800THX ^[226]	WFD (DR)	6 - 100	Lautsprecher	✓ 1.084
17	Onkyo - HT-S7805 ^[225]	WFD (DR)	6 - 100	Lautsprecher	✓ 776
18	Pioneer - HTTP-206 ^[237]	WFD (DR)	6 - 100	Lautsprecher	✓ 629
19	Sennheiser - PXC 550 Wireless ^[268]	HMD (DR)	6 - 100	OverEar	✓ 349
20	Sennheiser - Momentum True Wireless ^[270]	HMD (DR)	6 - 100	InEar	✓ 299
21	Sennheiser - IE 800 S ^[265]	HMD (DR)	6 - 100	OnEar	✓ 999
22	Sennheiser - HD 820 ^[267]	HMD (DR)	6 - 100	OverEar	✓ 2.399

Tabelle A-2: Auditive Displays in der Digitalen Realität

Nr.	Hersteller - Produkt	Displaytyp (geeignet für DR)	DOF [] - FOR [%]	Art	Erhältlich Kosten [€]
23	Sennheiser - PC 323D ^[266]	HMD (DR)	6 - 100	OverEar	✓ 129
24	Sennheiser - Ambeo Soundbar ^[269]	WFD (DR)	6 - 100	Soundbar	✓ 2.499
25	Sony - HT-ZF9 ^[284]	WFD (DR)	5 - 83	Lautsprecher	✓ 799
26	Sony - HT-ST5000 ^[285]	WFD (DR)	6 - 100	Lautsprecher	✓ 1.499
27	Sony - HMZ-T3W ^[288]	HMD (3D)	6 - 100	OverEar	✓ 1.798 (*)
28	Sony - HMZ-T1 ^[286]	HMD (2D/3D)	6 - 100	OverEar	✓ 1.098 (*)
29	Sony - HMZ-T2 ^[287]	HMD (2D/3D)	6 - 100	OverEar	✓ 998 (*)
30	Teufel - System 6 THX AVR ^[304]	WFD (DR)	6 - 100	Lautsprecher	✓ 3.700
31	Teufel - System 6 AVR ^[305]	WFD (DR)	6 - 100	Lautsprecher	✓ 3.100
32	Teufel - Cinesystem Trios ^[303]	WFD (DR)	6 - 100	Lautsprecher	✓ 1.500
33	Valve - Index ^[314]	HMD (VR)	6 - 100	OverEar	✓ 1.079 (*)
34	Yamaha - YHT-2950-EU ^[353]	WFD (DR)	6 - 100	Lautsprecher	✓ 467
35	Yamaha - YHT-1840 ^[352]	WFD (DR)	6 - 100	Lautsprecher	✓ 343

Hinweis: * : Gesamtsystem - VR-System (Head-Mounted-Display (HMD) + Audio)

✓ : als Produkt erhältlich

x : nicht als Produkt erhältlich

n.a. : nicht angegeben

Kosten: gerundete Werte

Tabelle A-3: Kennwerte der auditiven Displays

Nr.	Hersteller - Produkt	Übertragungsbereich [Hz]	Schalldruck [db]	Impedanz [Ω]	Kanal- anzahl	Anzahl Lautsprecher
1	Beyerdynamic - T5P ^[26]	5 - 50000	102	32	2.1	2
2	Beyerdynamic - Quincy ^[24]	5 - 50000	102	600	2.1	2
3	Beyerdynamic - MMX 300 ^[25]	5 - 35000	96	32	2.1	2
4	Bose - Surround Speaker 700 ^[35]	n.a.	n.a.	n.a.	2.1	3
5	Bose - Headphones 700 ^[36]	n.a.	n.a.	n.a.	2.1	2
6	Harman Kardon - Enchant 800 ^[133]	76 - 20000	98	n.a.	2.0	4
7	Hi-Shock - X6 ^[278]	n.a.	98	n.a.	2.0	2
8	HTC - Vive Pro ^[64]	n.a.	n.a.	n.a.	2.0	2
9	LG - SL10YG ^[182]	n.a. -192000	n.a.	n.a.	5.1.2	6
10	LG - LHB655NW ^[181]	n.a.	n.a.	n.a.	5.1	5
11	Logitech - G633 ^[187]	20 - 20000	107	39	7.1	2
12	Logitech - G560 ^[186]	40 - 18000	97	10	7.1	2.1
13	Logitech - G433 ^[185]	20 - 20000	107	32	7.1	2
14	Logitech - Z906 ^[188]	n.a.	n.a.	n.a.	5.1	6
15	Oculus - Rift ^[102]	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	2
16	Onkyo - HT-S9800THX ^[226]	50 - 45000	106	8	7.1	9
17	Onkyo - HT-S7805 ^[225]	55 - 50000	85	6	5.1.2	7
18	Pioneer - HTTP-206 ^[237]	n.a.	n.a.	6	5.1	5
19	Sennheiser - PXC 550 Wireless ^[268]	17 - 23000	110	46	2.1	2
20	Sennheiser - Momentum True Wireless ^[270]	5 - 21000	94	n.a.	2.1	2
21	Sennheiser - IE 800 S ^[265]	5 - 46500	125	16	2.1	2
22	Sennheiser - HD 820 ^[267]	6 - 48000	103	300	2.1	2
23	Sennheiser - PC 323D ^[266]	15 - 23000	113	32	7.1	2
24	Sennheiser - Ambeo Soundbar ^[269]	30 - 20000	n.a.	n.a.	5.1.4	13

Tabelle A-3: Kennwerte der auditiven Displays

Nr.	Hersteller - Produkt	Übertragungsbereich [Hz]	Schalldruck [db]	Impedanz [Ω]	Kanal- anzahl	Anzahl Lautsprecher
25	Sony - HT-ZF9 ^[284]	n.a.	n.a.	n.a.	3.1	4
26	Sony - HT-ST5000 ^[285]	n.a.	n.a.	n.a.	7.1.2	7
27	Sony - HMZ-T3W ^[288]	4 -27000	106	16	5.1	2
28	Sony - HMZ-T1 ^[286]	12 - 24000	106	24	5.1	2
29	Sony - HMZ-T2 ^[287]	5 - 24000	105	16	5.1	2
30	Teufel - System 6 THX AVR ^[304]	80 - 22000	108	8	5.2.4	16
31	Teufel - System 6 AVR ^[305]	80 - 22000	108	8	5.1.2	13
32	Teufel - Cinesystem Trios ^[303]	130 - 20000	104	8	5.1	11
33	Valve - Index ^[314]	40 - 24000	98	6	2.0	2
34	Yamaha - YHT-2950-EU ^[353]	20 - 20000	n.a.	6	5.1	5
35	Yamaha - YHT-1840 ^[352]	20 - 20000	83	6	5.1	5

Hinweis: (*) : Gesamtsystem / VR-System (HMD + Audio)

n.a.: nicht angegeben

A.1.3 Haptische Displays

Tabelle A-4: Haptische Displays in der Digitalen Realität

Nr.	Hersteller - Produkt	Displaytyp (geeignet für DR)	DOF - FOV	Tracking	Finger- tracking	Erhältlich Kosten [€]
1	3DSystems - PHANToM ^[2]	WFD (MR)	n.a. - 19	✓	x	✓ n.a.
2	Acer - AH101 ^[6]	HHD (MR)	32 - 46	✓	x	✓ 349 (*)
3	AnthroTronix - NuGlove ^[171]	HHD (DR)	62 - 38	✓	x	✓ n.a.
4	ART - FlyStick2 ^[13]	HHD (VR)	15 - 4	✓	x	x n.a.
5	ART - FlyStick3 ^[14]	HHD (VR)	13 - 4	✓	x	x n.a.
6	Asus - HC102 ^[15]	HHD (MR)	32 - 46	✓	x	✓ 429 (*)
7	Avatar VR - Touch VR ^[16]	OBD (MR)	62 - 38	✓	✓	✓ 1.499
8	bHaptics - Tactsuit ^[27]	OBD (VR)	24 - 35	x	x	x 1.335
9	Breq Labs - ExoGlove ^[40]	OBD (MR)	n.a. - 38	✓	n.a.	x n.a.
10	Captoglove - Captoglove ^[51]	OBD (MR)	62 - 38	✓	✓	✓ 440
11	Cute Center - Ambiotherm ^[57]	HMD (VR)	6 - 4	x	x	x n.a.
12	Cute Center - Season Traveller ^[69]	HMD (DR)	6 - 4	x	x	x n.a.
13	Cyber Glove Systems - CyberTouch ^[70]	HHD (MR)	62 - 38	x	x	✓ n.a.
14	Cyber Glove Systems - CyberTouch II ^[70]	HHD (MR)	62 - 38	x	x	✓ n.a.
15	Cyber Glove Systems - CyberForce ^[70]	HHD (MR)	62 - 46	✓	x	✓ n.a.
16	Cyber Glove Systems - CyberGrasp ^[70]	HHD (MR)	62 - 38	✓	✓	✓ n.a.
17	Dextarobotics - Dexmo ^[76]	OBD (VR)	62 - 38	✓	✓	✓ n.a.
18	EPFL - ExoSkin ^[231]	HHD (MR)	50 - 8	x	x	x n.a.
19	Feelreal - Sensory Mask ^[110]	HMD (VR)	6 - 4	x	x	✓ 185
20	Google - Daydream ^[117]	HHD (VR)	10 - 4	✓	x	✓ 109 (*)
21	GotouchVR - Glove Touch ^[120]	OBD (VR)	62 (**) - 38	✓	✓	x n.a.
22	GotouchVR - VRTouch ^[120]	OBD (VR)	62 (**) - 38	✓	✓	x n.a.

Tabelle A-4: Haptische Displays in der Digitalen Realität

Nr.	Hersteller - Produkt	Displaytyp (geeignet für DR)	DOF - FOV	Tracking	Finger- tracking	Erhältlich Kosten [€]
23	HaptX - Gloves ^[316]	OBD (VR)	62 - 46	✓	✓	x n.a.
24	Holosuit - HoloSuit ^[142]	OBD (VR)	n.a. - 35	✓	x	x n.a.
25	HTC - Vive Pro ^[64]	HHD (MR)	26 - 46	✓	x	✓ 1399 (*)
26	HTC - Vive ^[63]	HHD (MR)	26 - 46	✓	x	✓ 599 (*)
27	HTC - Vive Cosmos ^[65]	HHD (MR)	32 - 46	✓	x	✓ 799 (*)
28	HTC - Vive Focus ^[66]	HHD (MR)	10 - 46	✓	x	✓ 699 (*)
29	Lenovo - Mirage Solo ^[178]	HHD (VR)	10 - 4	✓	x	✓ 399 (*)
30	Lenovo - Explorer ^[179]	HHD (VR)	32 - 46	✓	x	✓ 429 (*)
31	Magic Leap - Magic Leap One ^[191]	HHD (AR)	11 - 4	✓	x	✓ 2.060 (*)
32	Manus VR - Prime One ^[193]	OBD (VR)	62 - 46	✓	✓	✓ 2.990
33	Manus VR - Prime Xsens ^[194]	OBD (VR)	62 - 46	✓	✓	✓ 3.990
34	Manus VR - Prime Haptic ^[195]	OBD (VR)	62 - 46	✓	✓	✓ 4.990
35	Masaryk University - FakeSpace Pinch Glove ^[165]	HHD (MR)	n.a. - 38	✓	x	x n.a.
36	NASA - DataGlove ^[248]	HHD (VR)	n.a. - 46	✓	x	x n.a.
37	Nintendo - Reality Vest 64 ^[275]	OBD (2D/3D)	n.a. - 8	x	x	✓ n.a.
38	Nintendo - Power Glove ^[275]	HHD (2D/3D)	3 - 0	x	x	✓ n.a.
39	Noitom Hi5 - VR Glove ^[219]	OBD (VR)	62 - 8	✓	✓	✓ 898
40	Oculus - Rift ^[103]	HHD (VR)	28 - 46	✓	x	✓ 499 (*)
41	Oculus - Quest ^[102]	HHD (VR)	28 - 46	✓	x	✓ 549 (*)
42	Oculus - Go ^[101]	HHD (VR)	11 - 4	✓	x	✓ 269 (*)
43	Oculus - Gear VR ^[104]	HHD (VR)	12 - 0	✓	x	✓ 120 (*)
44	Oculus - Rift S ^[105]	HHD (VR)	28 - 46	✓	x	✓ 449 (*)
45	Pico - G2 ^[232]	HHD (VR)	10 - 4	✓	x	✓ n.a.
46	Pico - Neo 2 ^[233]	HHD (VR)	28 - 8	✓	x	✓ 807 (*)
47	Plexus - VR Glove ^[238]	HHD (VR)	21 - 8	✓	✓	✓ 224

Tabelle A-4: Haptische Displays in der Digitalen Realität

Nr.	Hersteller - Produkt	Displaytyp (geeignet für DR)	DOF - FOV	Tracking	Finger- tracking	Erhältlich Kosten [€]
48	Samsung - Odyssey ^[254]	HHD (VR)	30 - 46	✓	x	✓ 100 (*)
49	Senso - Senso Suit ^[271]	OBD (MR)	51 - 23	x	x	✓ 599
50	Senso - Senso Glove ^[271]	OBD (MR)	62 - 8	✓	✓	✓ n.a.
51	Sensoryx - VRFree ^[272]	OBD (VR)	62 - 46	✓	✓	✓ 110
52	Sensoryx - VRFree Haptic ^[272]	OBD (VR)	62 - 46	✓	✓	x n.a.
53	Sixense Enterprise - Stem ^[280]	HHD (MR)	34 - 46	✓	x	✓ n.a.
54	Teslasuit - The Suit ^[302]	OBD (VR)	n.a. - 23	x	x	x n.a.
55	TGO - Etee ^[299]	HHD (MR)	62 - 8	x	x	✓ 1.345
56	TU Chemnitz - FlyStick ^[128]	HHD (VR)	8 - 4	✓	x	x n.a.
57	Ultrahaptics - Leap Motion ^[311]	OBD (MR)	62 - 46	✓	✓	✓ 81
58	Ultrahaptics - Stratos Insprie Haptic Module ^[312]	WFD (MR)	62 - 46	✓	✓	✓ 7.300
59	University Taipei - LiquidMask ^[184]	HMD (MR)	n.a. - 4	x	x	x n.a.
60	University Trier - Rutgers Master II ^[38]	HHD (MR)	30 - 38	x	x	x n.a.
61	Valve - Index ^[314]	OBD (VR)	42 - 46	✓	✓	✓ 1.079 (*)
62	VOID - Rapture Vest ^[275]	OBD (VR)	6 - 8	x	x	✓ n.a.
63	VRgluv - VRgluv ^[301]	OBD (MR)	62 - 46	x	x	x n.a.
64	Xsens - Xsens MVN ^[349]	OBD (MR)	57 - 31	✓	x	x n.a.

Hinweis: * : Gesamtsystem - VR-System (HMD + Controller)

** : abhängig des Tracking-Systems

✓ : verfügbar/vorhanden

x : nicht verfügbar/nicht vorhanden

n.a. : nicht angegeben

Kosten: gerundete Werte

Tabelle A-5: Feedback der Haptischen Displays

Nr.	Hersteller - Produkt	Vibration	Temperatur	Kraftfeedback	Wind / Wasser
1	3DSYSTEMS - PHANTOM ^[2]	x	x	✓	x
2	Acer - AH101 ^[6]	✓	x	x	x
3	AnthroTronix - NuGlove ^[171]	✓	x	x	x
4	ART - FlyStick2 ^[13]	x	x	x	x
5	ART - FlyStick3 ^[14]	x	x	x	x
6	Asus - HC102 ^[15]	✓	x	x	x
7	Avatar VR - Touch VR ^[16]	✓	x	x	x
8	bHaptics - Tactsuit ^[27]	✓	x	x	x
9	Breq Labs - ExoGlove ^[40]	n.a.	x	x	x
10	Captoglove - Captoglove ^[51]	x	x	x	x
11	Cute Center - Ambiotherm ^[57]	x	✓	x	✓
12	Cute Center - Season Traveller ^[69]	✓	x	x	✓
13	Cyber Glove Systems - CyberTouch ^[70]	✓	x	x	x
14	Cyber Glove Systems - CyberTouch II ^[70]	✓	x	x	x
15	Cyber Glove Systems - CyberForce ^[70]	x	x	✓	x
16	Cyber Glove Systems - CyberGrasp ^[70]	x	x	✓	x
17	Dextarobotics - Dexmo ^[76]	x	x	✓	x
18	EPFL - ExoSkin ^[231]	✓	x	✓	x
19	Feelreal - Sensory Mask ^[110]	✓	✓	x	✓
20	Google - Daydream ^[117]	x	x	x	x
21	GotouchVR - Glove Touch ^[120]	x	x	✓	x
22	GotouchVR - VRTouch ^[120]	x	x	✓	x
23	HaptX - Gloves ^[316]	✓	x	✓	x
24	Holosuit - HoloSuit ^[142]	n.a.	n.a.	n.a.	x
25	HTC - Vive Pro ^[64]	✓	x	x	x

Tabelle A-5: Feedback der Haptischen Displays

Nr.	Hersteller - Produkt	Vibration	Temperatur	Kraftfeedback	Wind / Wasser
26	HTC - Vive ^[63]	✓	x	x	x
27	HTC - Vive Cosmos ^[65]	✓	x	x	x
28	HTC - Vive Focus ^[66]	x	x	x	x
29	Lenovo - Mirage Solo ^[178]	x	x	x	x
30	Lenovo - Explorer ^[179]	✓	x	x	x
31	Magic Leap - Magic Leap One ^[191]	x	x	x	x
32	Manus VR - Prime One ^[193]	x	x	x	x
33	Manus VR - Prime Xsens ^[194]	x	x	x	x
34	Manus VR - Prime Haptic ^[195]	✓	x	x	x
35	Masaryk University - FakeSpace Pinch Glove ^[165]	✓	x	x	x
36	NASA - DataGlove ^[248]	x	x	x	x
37	Nintendo - Reality Vest 64 ^[275]	✓	x	x	x
38	Nintendo - Power Glove ^[275]	x	x	x	x
39	Noitom Hi5 - VR Glove ^[219]	✓	x	x	x
40	Oculus - Rift ^[103]	✓	x	x	x
41	Oculus - Quest ^[102]	✓	x	x	x
42	Oculus - Go ^[101]	x	x	x	x
43	Oculus - Gear VR ^[104]	x	x	x	x
44	Oculus - Rift S ^[105]	✓	x	x	x
45	Pico - G2 ^[232]	✓	x	x	x
46	Pico - Neo 2 ^[233]	x	x	x	x
47	Plexus - VR Glove ^[238]	✓	x	x	x
48	Samsung - Odyssey ^[254]	✓	x	x	x
49	Senso - Senso Suit ^[271]	✓	x	x	x
50	Senso - Senso Glove ^[271]	✓	x	x	x
51	Sensoryx - VRFree ^[272]	x	x	x	x

Tabelle A-5: Feedback der Haptischen Displays

Nr.	Hersteller - Produkt	Vibration	Temperatur	Kraftfeedback	Wind / Wasser
52	Sensoryx - VRFree Haptic ^[272]	✓	x	x	x
53	Sixense Enterprise - Stem ^[280]	✓	x	x	x
54	Teslasuit - The Suit ^[302]	✓	✓	x	x
55	TG0 - Etee ^[299]	n.a.	x	x	x
56	TU Chemnitz - FlyStick ^[128]	x	x	x	x
57	Ultrahaptics - Leap Motion ^[311]	x	x	x	x
58	Ultrahaptics - Stratos Insprie Haptic Module ^[312]	x	x	✓	x
59	University Taipei - LiquidMask ^[184]	x	✓	x	✓
60	University Trier - Rutgers Master II ^[38]	x	x	✓	x
61	Valve - Index ^[314]	✓	x	~	x
62	VOID - Rapture Vest ^[275]	✓	x	x	x
63	VRgluv - VRgluv ^[301]	x	x	✓	x
64	Xsens - Xsens MVN ^[349]	x	x	x	x

Hinweis: * : Gesamtsystem - VR-System (HMD + Controller)

** : abhängig des Tracking-Systems

✓ : verfügbar/vorhanden

x : nicht verfügbar/nicht vorhanden

n.a.: nicht angegeben

A.1.4 Olfaktorische Displays

Tabelle A-6: Olfaktorische Displays in der Digitalen Realität

Nr.	Hersteller - Produkt	Displaytyp (geeignet für DR)	DOF - FOV	Chemisch	Elektrisch	Erhältlich Kosten [€]
1	AnthroTronix Inc. - Scent Collar ^[12]	OBD (DR)	6 - 13	✓	x	x n.a.
2	Cambridge MA - Essence ^[8]	OBD (DR)	6 - 10	✓	x	x n.a.
3	Camsoda - Ohroma ^[162]	HMD (VR)	6 - 100	✓	x	✓ 90
4	Cute Center - Season Traveller ^[69]	HMD (DR)	6 - *	✓	x	x n.a.
5	Exhalia USA - uScent ^[99]	WFD (DR)	6 - *	✓	x	✓ n.a.
6	Feelreal - Sensory Mask ^[110]	HMD (VR)	6 - 100	✓	x	✓ 268
7	Firesales - Burning Smell ^[245]	WFD (MR)	6 - 3	✓	x	✓ 24
8	McCarthy - Smellitzer ^[201]	WFD (DR)	0 - *	✓	x	✓ n.a.
9	Meijo University - SpotScents ^[213]	WFD (DR)	5 - *	✓	x	x n.a.
10	MicroScent LLC - MicroScent ^[206]	WFD (DR)	6 - *	✓	x	x n.a.
11	National Taiwan University - Lotus ^[55]	OBD (MR)	6 - 17	✓	x	x n.a.
12	Nosulus - Nosulus Rift ^[310]	HMD (VR)	6 - 3	✓	x	x n.a.
13	Olorama Tech - Olorama ^[223]	WFD (MR)	6 - 33	✓	x	✓ 1.799
14	ScentAir - ScentWave ^[255]	WFD (DR)	6 - 100	✓	x	✓ 135
15	ScentAir - ScentDirect ^[255]	WFD (DR)	6 - 23	✓	x	x n.a.
16	Scentee - Scentee Machina ^[256]	WFD (MR)	6 - 47	✓	x	✓ n.a.
17	Tokai University - Air Cannon ^[354]	WFD (DR)	5 - *	✓	x	x n.a.
18	Tokjo University - Smelling Screen ^[199]	WFD (3D)	2 - *	✓	x	x n.a.
19	Tokjo University - Cooking Up ^[214]	WFD (MR)	6 - 100	✓	x	x n.a.
20	Tokjo University - Wearable Display ^[351]	OBD (DR)	6 - *	✓	x	x n.a.
21	Ulm University - inScent ^[80]	OBD (DR)	6 - 13	✓	x	x n.a.
22	University of Bristol - SensaBubble ^[264]	WFD (DR)	5 - *	✓	x	x n.a.

Tabelle A-6: Olfaktorische Displays in der Digitalen Realität

Nr.	Hersteller - Produkt	Displaytyp (geeignet für DR)	DOF - FOV	Chemisch	Elektrisch	Erhältlich Kosten [€]
23	University of London - Digital Smell ^[56]	OBD (DR)	n.a. - 30	x	✓	x n.a.
24	Vaqso - Vaqso VR ^[315]	HMD (VR)	6 - 17	✓	x	✓ 897
25	York TU - Virtual Cocoon ^[53]	HMD (VR)	n.a. - *	✓	x	✓ n.a.

Hinweis: * : nicht ermittelbar
✓ : verfügbar/vorhanden
x : nicht verfügbar/nicht vorhanden
n.a. : nicht angegeben
Kosten: gerundete Werte

A.1.5 Gustatorische Displays

Tabelle A-7: Gustatorische Displays in der Digitalen Realität

Nr.	Hersteller - Produkt	Displaytyp (geeignet für DR)	DOF - FOV	Chemisch	Elektrisch	Erhältlich Kosten [€]
1	Cute Center - Vocktail ^[58]	HHD (MR)	6 - 83	x	✓	x n.a.
2	Cute Center - Virtual Lemonade ^[59]	HHD (MR)	6 - 67	x	✓	x n.a.
3	Cute Center - Digital Taste ^[240]	OBD (MR)	3 - 50	x	✓	x n.a.
4	Cute Center - Digital Lollipop ^[241]	OBD (MR)	3 - *	x	✓	x n.a.
5	Standford University - TasteScreen ^[200]	OBD (DR)	1 - 50	✓	x	x n.a.
6	The Right Cup - The Right Cup ^[306]	HHD (MR)	6 - 33	✓	x	✓ 17
7	University of London - Electric Taste Actuator ^[56]	OBD (DR)	n.a. - *	x	✓	x n.a.
8	University of London - Thermal Taste ^[56]	OBD (DR)	n.a. - *	x	x	x n.a.
9	University of Tokyo - MetaCookie ^[216]	HMD (VR)	6 - 100	✓	x	x n.a.

Hinweis: * : nicht ermittelbar
 ✓ : verfügbar/vorhanden
 x : nicht verfügbar/nicht vorhanden
 n.a. : nicht angegeben
 Kosten: gerundete Werte

A.1.6 Bewegungsplattformen

Tabelle A-8: VR-Laufbänder in der Digitalen Realität

Nr.	Hersteller - Produkt	Displaytyp (geeignet für DR)	DOF - FOV	Drehung [°]	Vibration	Erhältlich Kosten [€]
1	3D run - Cybershoes ^[1]	OBD (VR)	11 - 44	360	x	✓ 359
2	Acer - AH101 ^[6]	HMD (MR)	36 - 89	360	x	✓ 349 (**)
3	Asus - HC102 ^[15]	HMD (MR)	36 - 89	360	x	✓ 429 (**)
4	Brunner - VR-Motion 200 ^[43]	WFD (VR)	6 - 11	360	✓	✓ n.a.
5	Cyberith - Virtualizer ^[71]	WFD (VR)	12 - 78	360	x	✓ 9.500
6	Cyberith - Virtualizer Elite 2 ^[72]	WFD (VR)	14 - 78	360	✓	✓ n.a.
7	CyberSphere - CyberSphere ^[112]	WFD (VR)	n.a. - *	360	x	x n.a.
8	Eight360 - Nova Motion ^[87]	WFD (VR)	6 - 22	360	x	x n.a.
9	Feel Three - Feel Three ^[109]	WFD (VR)	5 - 22	360	✓	✓ 9.020
10	HP - Reverb ^[62]	HMD (MR)	36 - 89	360	x	✓ 739 (**)
11	HTC - Vive Pro ^[64]	HMD (MR)	36 - 89	360	x	✓ 1.399 (**)
12	HTC - Vive ^[63]	HMD (MR)	36 - 89	360	x	✓ 599 (**)
13	HTC - Vive Cosmos ^[65]	HMD (MR)	36 - 89	360	x	✓ 799 (**)
14	Infinadeck - Infinadeck ^[149]	WFD (VR)	11 - 72	360	x	x n.a.
15	KatVR - Kat Loco ^[155]	WFD (VR)	5 - 89	360	x	x n.a.
16	KatVR - Kat Walk Mini ^[155]	WFD (VR)	12 - 72	360	x	✓ 2.500
17	KatVR - Kat Walk ^[155]	WFD (VR)	12 - 72	360	x	✓ n.a.
18	KatVR - Kat Walk Premium ^[155]	WFD (VR)	12 - 72	360	x	✓ n.a.
19	Lenovo - Explorer ^[178]	HMD (VR)	36 - 89	360	x	✓ 429 (**)
20	Oculus - Rift S ^[103]	HMD (VR)	36 - 89	360	x	✓ 449 (**)
21	Oculus - Rift ^[102]	HMD (VR)	36 - 89	360	x	✓ 499 (**)
22	Oculus - Quest ^[105]	HMD (VR)	36 - 89	360	x	✓ 549 (**)

Tabelle A-8: VR-Laufbänder in der Digitalen Realität

Nr.	Hersteller - Produkt	Displaytyp (geeignet für DR)	DOF - FOV	Drehung [°]	Vibration	Erhältlich Kosten [€]
23	Omnifinity - Omnideck ^[224]	WFD (VR)	11 - 67	360	x	✓ n.a.
24	Roto - VR Chair ^[249]	WFD (VR)	3 - 33	360	✓	✓ 1.850
25	Samsung - Odyssey ^[254]	HMD (VR)	36 - 89	360	x	✓ 790 (**)
26	Samsung - Odyssey+ ^[254]	HMD (VR)	36 - 89	360	x	✓ 447 (**)
27	Sarcos - Sarcos Uniport ^[275]	WFD (VR)	4 - 11	0	x	x n.a.
28	Sensoryx - VRFree Sole ^[272]	OBD (VR)	11 - 78	360	✓	✓ n.a.
29	Transfinity - VR Action Board ^[309]	WFD (VR)	3 - 44	360	x	✓ n.a.
30	Transfinity - VR Rocket Rider ^[309]	WFD (VR)	3 - 22	0	x	✓ n.a.
31	Transfinity - VR Flight Rider ^[309]	WFD (VR)	3 - 17	0	✓	✓ n.a.
32	Valve - Index ^[314]	HMD (VR)	36 - 89	360	x	✓ 1.079 (**)
33	Varjo - VR-1 ^[317]	HMD (VR)	36 - 89	360	x	✓ 5.995 (**)
34	Varjo - VR-2 ^[318]	HMD (VR)	36 - 89	360	x	✓ 5.995 (**)
35	Virtuix - Omni ^[322]	WFD (VR)	11 - 72	360	x	✓ n.a.
36	Virtusphere Inc. - VirtuSphere ^[323]	WFD (VR)	11 - 78	360	x	x n.a.
37	Visbox - VisCube M4 ^[327]	WFD (VR)	6 - 89	360	x	✓ n.a.
38	Visbox - VisCube C4 ^[326]	WFD (VR)	6 - 89	360	x	✓ n.a.
39	Visbox - VisCube C4-4K ^[325]	WFD (VR)	6 - 89	360	x	✓ n.a.
40	Visbox - VisCube C4-T2 ^[325]	WFD (VR)	6 - 89	360	x	✓ n.a.
41	Visbox - VisCube C4-T3 ^[325]	WFD (VR)	6 - 89	360	x	✓ n.a.
42	Visbox - VisCube C4-T3X ^[325]	WFD (VR)	6 - 89	360	x	✓ n.a.
43	Viscon - Bench ^[330]	WFD (VR)	6 - 78	360	x	✓ n.a.
44	Viscon - Powerwall ^[329]	WFD (3D-Stereo)	0 - 72	360	x	✓ n.a.
45	Viscon - Dome ^[332]	WFD (VR)	6 - 78	360	x	✓ n.a.
46	Viscon - Cave ^[331]	WFD (VR)	6 - 83	360	x	✓ n.a.
47	Visospace - Alto 100 ^[333]	WFD (VR)	5 - 33	360	✓	x n.a.

Tabelle A-8: VR-Laufbänder in der Digitalen Realität

Nr.	Hersteller - Produkt	Displaytyp (geeignet für DR)	DOF - FOV	Drehung [°]	Vibration	Erhältlich Kosten [€]
48	WalkOVR - WalkOVR ^[338]	OBD (VR)	5 - 89	360	x	✓ 250
49	Werigi - Cave ^[331]	WFD (VR)	6 - 83	360	x	✓ n.a.
50	Xtrematic - Extreme-Machine ^[350]	WFD (VR)	2 - 22	120	✓	✓ n.a.
51	Yaw - Yaw VR Pro ^[355]	WFD (VR)	5 - 28	360	x	✓ 945

Hinweis: ~ : teilweise
 * : nicht ermittelbar
 ** : Gesamtsystem VR-System
 ✓ : verfügbar/vorhanden
 x : nicht verfügbar/nicht vorhanden
 n.a. : nicht angegeben
 Kosten: gerundete Werte

Tabelle A-9: Bewegungsmöglichkeiten der VR-Laufbänder

Nr.	Hersteller - Produkt	Laufen	Lauf- attrappe	Sitzen	Knien	Steig- ung
1	3D run - Cybershoes ^[1]	~	✓	✓	x	x
2	Acer - AH101 ^[6]	✓	x	✓	✓	✓
3	Asus - HC102 ^[15]	✓	x	✓	✓	✓
4	Brunner - VR-Motion 200 ^[43]	x	x	✓	x	x
5	Cyberith - Virtualizer ^[71]	✓	x	x	✓	x
6	Cyberith - Virtualizer Elite 2 ^[72]	✓	x	x	✓	✓
7	CyberSphere - CyberSphere ^[112]	✓	x	✓	✓	x
8	Eight360 - Nova Motion ^[87]	x	x	✓	x	x
9	Feel Three - Feel Three ^[109]	x	x	✓	x	x
10	HP - Reverb ^[62]	✓	x	✓	✓	✓
11	HTC - Vive Pro ^[64]	✓	x	✓	✓	✓
12	HTC - Vive ^[63]	✓	x	✓	✓	✓
13	HTC - Vive Cosmos ^[65]	✓	x	✓	✓	✓
14	Infinadeck - Infinadeck ^[149]	✓	x	x	x	x
15	KatVR - Kat Loco ^[155]	x	✓	x	✓	x
16	KatVR - Kat Walk Mini ^[155]	✓	x	x	x	x
17	KatVR - Kat Walk ^[155]	✓	x	x	✓	x
18	KatVR - Kat Walk Premium ^[155]	✓	x	x	✓	x
19	Lenovo - Explorer ^[178]	✓	x	✓	✓	✓
20	Oculus - Rift S ^[103]	✓	x	✓	✓	✓
21	Oculus - Rift ^[102]	✓	x	✓	✓	✓
22	Oculus - Quest ^[105]	✓	x	✓	✓	✓
23	Omnifinity - Omnideck ^[224]	✓	x	x	x	✓
24	Roto - VR Chair ^[249]	x	x	✓	x	x
25	Samsung - Odyssey ^[254]	✓	x	✓	✓	✓
26	Samsung - Odyssey+ ^[254]	✓	x	✓	✓	✓
27	Sarcos - Sarcos Uniport ^[275]	x	x	✓	x	x
28	Sensoryx - VRFree Sole ^[272]	x	✓	x	x	x
29	Transfinity - VR Action Board ^[309]	x	✓	x	x	x
30	Transfinity - VR Rocket Rider ^[309]	x	x	✓	x	✓
31	Transfinity - VR Flight Rider ^[309]	x	x	✓	x	x
32	Valve - Index ^[314]	✓	x	✓	✓	✓
33	Varjo - VR-1 ^[317]	✓	x	✓	✓	✓
34	Varjo - VR-2 ^[318]	✓	x	✓	✓	✓
35	Virtuix - Omni ^[322]	✓	x	x	✓	x
36	Virtusphere Inc. - VirtuSphere ^[323]	✓	x	✓	✓	x

Tabelle A-9: Bewegungsmöglichkeiten der VR-Laufbänder

Nr.	Hersteller - Produkt	Laufen	Lauf- attrappe	Sitzen	Knien	Steig- ung
37	Visbox - VisCube M4 ^[327]	✓	x	✓	✓	✓
38	Visbox - VisCube C4 ^[326]	✓	x	✓	✓	✓
39	Visbox - VisCube C4-4K ^[325]	✓	x	✓	✓	✓
40	Visbox - VisCube C4-T2 ^[325]	✓	x	✓	✓	✓
41	Visbox - VisCube C4-T3 ^[325]	✓	x	✓	✓	✓
42	Visbox - VisCube C4-T3X ^[325]	✓	x	✓	✓	✓
43	Viscon - Bench ^[330]	✓	x	✓	✓	✓
44	Viscon - Powerwall ^[329]	✓	x	✓	✓	✓
45	Viscon - Dome ^[332]	✓	x	✓	✓	✓
46	Viscon - Cave ^[331]	✓	x	✓	✓	✓
47	Visospace - Alto 100 ^[333]	x	✓	x	x	x
48	WalkOVR - WalkOVR ^[338]	✓	x	x	✓	✓
49	Werigi - Cave ^[331]	✓	x	✓	✓	✓
50	Xtrematic - Extreme-Machine ^[350]	x	✓	x	x	x
51	Yaw - Yaw VR Pro ^[355]	x	x	✓	x	x

Hinweis: ~ : teilweise
 * : nicht ermittelbar
 ** : Gesamtsystem VR-System
 ✓ : verfügbar/vorhanden
 x : nicht verfügbar/nicht vorhanden
 n.a. : nicht angegeben
 Kosten: gerundete Werte

A.2 Ingenieur Anwendungen in der Digitalen Realität

Tabelle A-10: Bewertete Ingenieur Anwendungen von VR, AR, AV & MR

Nr.	Name	Bereich	Digitale Realität	Display-typ	Dokumentationsqualität	Produkt
1	.Bim to .ar ^[291]	Betrieb	AR	HMD	gut	✓
2	4D BIM AR ^[205]	Bau	AR	HHD	ausreichend	x
3	Accessibility Validation ^[141]	Planung	VR	HMD	gut	x
4	AR App Robotik ^[251]	Ausbildung	AR	HMD	ausreichend	x
5	AR App Robotik ^[335]	Bau	AR	HHD	ausreichend	✓
6	AR CAD ^[160]	Bau	AR	Fishtank-Display	ausreichend	x
7	AR Chemistry ^[126]	Ausbildung	AR	HHD	ausreichend	x
8	AR Monitoring ^[319]	Betrieb	AR	HHD	gut	x
9	AR Plan 3D ^[123]	Betrieb	AR	HHD	ausreichend	✓
10	AR Ruler ^[123]	Betrieb	AR	HHD	ausreichend	✓
11	AR Services ^[196]	Planung	AR	HHD	ausreichend	✓
12	ARC ^[125]	Ausbildung	AR	HHD	gut	x
13	ARCam ^[276]	Planung	AR	WFD	mangelhaft	x
14	Architecture AR ^[294]	Planung	AR	HHD	mangelhaft	✓
15	ARSul ^[11]	Betrieb	AR	HMD	ausreichend	x
16	Atlas VR ^[113]	Planung	VR	HMD	ausreichend	✓
17	AUGmentecture ^[31]	Planung	AR	HHD	ausreichend	✓
18	Auto AR ^[218]	Planung	AR	HMD	ausreichend	x
19	Auvirea ^[163]	Betrieb	AR	HHD	mangelhaft	✓
20	BIM AR ^[60]	Bau	AR	HHD	mangelhaft	x
21	BIM2MAR ^[345]	Bau	AR	HHD	mangelhaft	x
22	BIM-Phase AR ^[358]	Bau	AR	HHD	gut	x

Tabelle A-10: Bewertete Ingenieur Anwendungen von VR, AR, AV & MR

Nr.	Name	Bereich	Digitale Realität	Display- typ	Dokument- ationsqualität	Produkt
23	CAFM ^[150]	Betrieb	AR	HMD	mangelhaft	✓
24	D ⁴ AR ^[115]	Bau	AR	HHD	gut	x
25	DARCC ^[131]	Bau	AR	HMD	ausreichend	x
26	DM-AR App ^[169]	Bau	AR	HHD	gut	x
27	Evacuation Test ^[141]	Ausbildung	VR	HMD	gut	x
28	Firefighter Training ^[190]	Ausbildung	VR	HMD	mangelhaft	✓
29	Flow VR ^[7]	Betrieb	VR	HMD	gut	x
30	Fuzor VR ^[153]	Planung	VR	HMD	ausreichend	✓
31	Gamma AR ^[81]	Betrieb	AR	HHD	gut	✓
32	Geospatial AR ^[295]	Betrieb	AR	HHD	ausreichend	x
33	Hazard VR ^[230]	Ausbildung	VR	WFD	ausreichend	x
34	HD ⁴ AR ^[17]	Betrieb	AR	HHD	gut	x
35	Hololens App ^[218]	Betrieb	AR	HMD	ausreichend	x
36	ILehLe ^[307]	Ausbildung	AR	HHD	gut	x
37	LandscapAR ^[298]	Planung	AR	HHD	gut	✓
38	M4 Virtual ^[262]	Planung	VR	HMD	gut	✓
39	Machine Training ^[190]	Ausbildung	VR	HMD	mangelhaft	✓
40	magicplan ^[32]	Betrieb	AR	HHD	gut	✓
41	Nomad AR ^[320]	Bau	AR	HHD	ausreichend	✓
42	O&M ^[177]	Betrieb	AR	HHD	mangelhaft	x
43	PARS ^[88]	Ausbildung	360-Grad	Fishtank-Display	gut	x
44	Paschal AR-App ^[292]	Planung	VR	HHD	mangelhaft	✓
45	Plan Bridge ^[253]	Planung	3D	Fishtank-Display	ausreichend	x
46	Quang et. al ^[174]	Ausbildung	3D	HHD	mangelhaft	x
47	Quang et. al ^[175]	Ausbildung	3D	Fishtank-Display	ausreichend	x

Tabelle A-10: Bewertete Ingenieur Anwendungen von VR, AR, AV & MR

Nr.	Name	Bereich	Digitale Realität	Display-typ	Dokumentationsqualität	Produkt
48	Quang et. al ^[174]	Ausbildung	AR	HHD	mangelhaft	x
49	Rivex ^[282]	Planung	VR	HMD	mangelhaft	✓
50	Safety Training ^[360]	Ausbildung	3D	Fishtank-Display	mangelhaft	x
51	Sensor AR ^[300]	Betrieb	AR	HHD	sehr gut	x
52	Smart Reality ^[22]	Bau	AR	HHD	mangelhaft	✓
53	SMVS ^[228]	Ausbildung	3D	Fishtank-Display	mangelhaft	x
54	SMVS ^[228]	Bau	AR	HHD	ausreichend	x
55	Time-Lapse 3D ^[146]	Bau	3D	Fishtank-Display	ausreichend	x
56	TwinBIM ^[73]	Bau	AR	HHD	gut	✓
57	Unity Reflect ^[313]	Planung	AR	HHD	ausreichend	✓
58	VEROSIM AR ^[244]	Bau	AR	HHD	ausreichend	✓
59	Video AR ^[274]	Ausbildung	AR	Fishtank-Display	gut	x
60	Virtually Here ^[321]	Planung	AR	HMD	ausreichend	✓
61	VR Secure Training ^[252]	Ausbildung	VR	WFD	ausreichend	x

Tabelle A-11: Pan-Faktor der Ingenieur Anwendungen von VR, AR, AV & MR

Nr.	Name	Anzahl Sinne	Immersion [PP]	Präsenz [PP]	Wechselwirkung [PP]	Pan-Faktor [PP]
1	.Bim to .ar ^[291]	2	16	20	5	41
2	4D BIM AR ^[205]	1	9	20	0	29
3	Accessibility Validation ^[141]	1	10	16	4	30
4	AR App Robotik ^[251]	2	16	20	5	41
5	AR App Robotik ^[335]	2	18	20	5	43
6	AR CAD ^[160]	2	15	3	6	24
7	AR Chemistry ^[126]	1	10	10	6	26
8	AR Monitoring ^[319]	2	16	20	6	42
9	AR Plan 3D ^[123]	1	14	20	6	40
10	AR Ruler ^[123]	1	14	20	6	40
11	AR Services ^[196]	1	10	20	0	30
12	ARC ^[125]	1	9	20	0	29
13	ARCam ^[276]	1	9	10	0	19
14	Architecture AR ^[294]	1	11	20	0	31
15	ARSul ^[11]	1	10	19	7	36
16	Atlas VR ^[113]	1	10	13	0	23
17	AUGmentecture ^[31]	1	9	16	0	25
18	Auto AR ^[218]	1	10	20	0	30
19	Auvirea ^[163]	1	12	20	6	38
20	BIM AR ^[60]	1	12	20	2	34
21	BIM2MAR ^[345]	1	14	20	6	40
22	BIM-Phase AR ^[358]	1	10	20	4	34
23	CAFM ^[150]	2	16	20	6	42
24	D ⁴ AR ^[115]	1	8	0	0	8

Tabelle A-11: Pan-Faktor der Ingenieur Anwendungen von VR, AR, AV & MR

Nr.	Name	Anzahl Sinne	Immersion [PP]	Präsenz [PP]	Wechselwirkung [PP]	Pan-Faktor [PP]
25	DARCC ^[131]	2	19	20	9	48
26	DM-AR App ^[169]	2	17	20	2	39
27	Evacuation Test ^[141]	3	21	16	4	41
28	Firefighter Training ^[190]	3	28	16	7	51
29	Flow VR ^[7]	2	12	17	8	37
30	Fuzor VR ^[153]	2	22	14	8	44
31	Gamma AR ^[81]	2	17	20	11	48
32	Geospatial AR ^[295]	2	13	20	4	37
33	Hazard VR ^[230]	2	18	16	8	42
34	HD ⁴ AR ^[17]	2	12	20	6	38
35	Hololens App ^[218]	1	5	20	4	29
36	ILehLe ^[307]	2	13	20	4	37
37	LandscapAR ^[298]	1	9	20	0	29
38	M4 Virtual ^[262]	2	18	16	7	41
39	Machine Training ^[190]	3	28	16	7	51
40	magicplan ^[32]	2	17	20	6	43
41	Nomad AR ^[320]	2	18	20	4	42
42	O&M ^[177]	2	14	20	2	36
43	PARS ^[88]	2	14	10	4	28
44	Paschal AR-App ^[292]	1	13	18	6	37
45	Plan Bridge ^[253]	2	17	13	5	35
46	Quang et. al ^[174]	2	17	9	3	29
47	Quang et. al ^[175]	2	17	16	8	41
48	Quang et. al ^[174]	2	13	16	0	29
49	Rivex ^[282]	2	18	16	0	34

Tabelle A-11: Pan-Faktor der Ingenieur Anwendungen von VR, AR, AV & MR

Nr.	Name	Anzahl Sinne	Immersion [PP]	Präsenz [PP]	Wechselwirkung [PP]	Pan-Faktor [PP]
50	Safety Training ^[360]	2	18	13	6	37
51	Sensor AR ^[300]	2	13	20	6	39
52	Smart Reality ^[22]	1	10	18	0	28
53	SMVS ^[228]	2	15	13	6	34
54	SMVS ^[228]	2	16	20	6	42
55	Time-Lapse 3D ^[146]	1	11	5	6	22
56	TwinBIM ^[73]	2	13	20	2	35
57	Unity Reflect ^[313]	2	16	18	4	38
58	VEROSIM AR ^[244]	1	16	20	2	38
59	Video AR ^[274]	1	8	6	0	14
60	Virtually Here ^[321]	1	12	20	4	36
61	VR Secure Training ^[252]	2	18	16	8	42

Tabelle A-12: Schätzung zur technischen Umsetzbarkeit des Pan-Faktors verschiedener Medien anhand der Hardwareanalyse A.1

Faktor	2D		3D		360°-Foto		360°-Video		VR		AV		AR	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Anzahl Sinne	2	5	1	5	1	5	1	5	2	5	2	5	1	5
Immersion [PP]	8	47	5	58	4	56	4	56	10	58	10	58	5	58
Präsenz [PP]	0	7	0	14	4	14	4	14	4	18	5	19	5	20
Wechselwirkung [PP]	0	13	0	16	0	13	0	15	0	18	3	18	0	20
Pan-Faktor [PP]	8	67	5	88	8	83	8	85	14	94	18	95	10	98

A.3 Handlungsempfehlung mittels Pan-Faktor

A.3.1 Übersicht

1

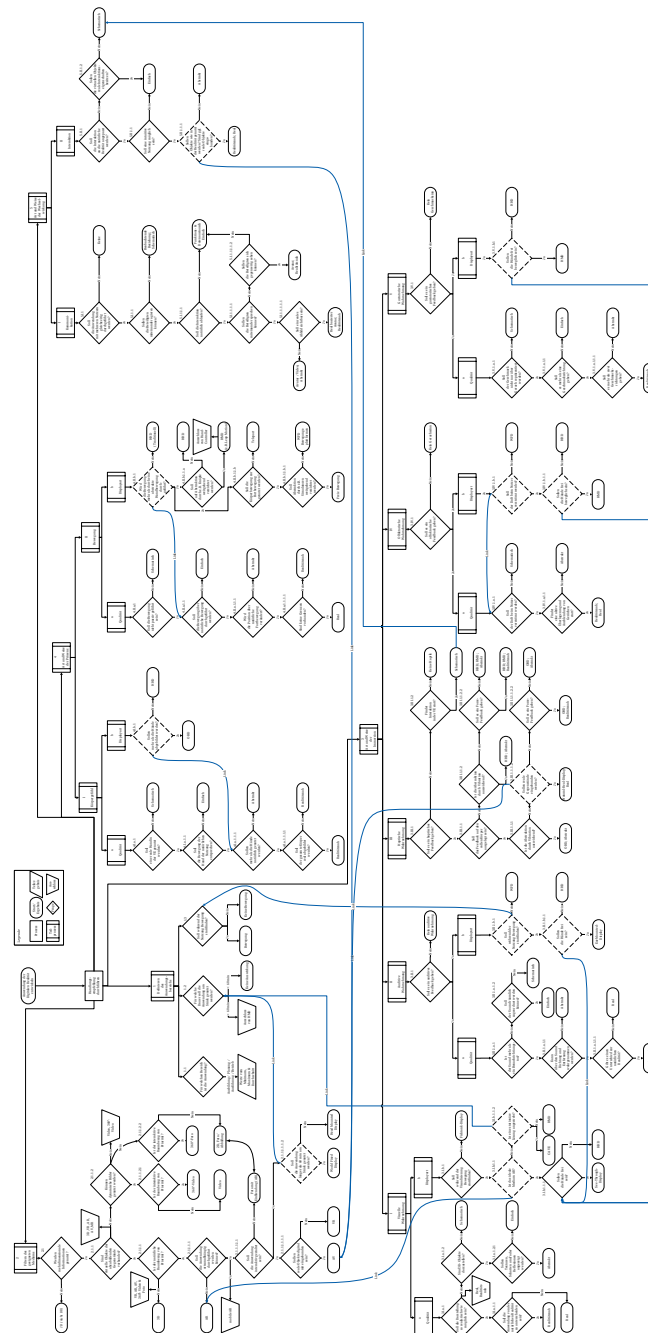


Abbildung A-1: Handlungsempfehlung mittels Pan-Faktor

¹ Diese Graphik ist nur im PDF-Dokument mit Zoomfunktion deutlich erkennbar. Für die Visualisierung in einer gedruckten Version sind im Kapitel des Konzepts alle Bestandteile einzeln dargestellt.

A.3.2 Fragesammlung

Tabelle A-13: Fragen und Verknüpfungen der Handlungsempfehlung.

Nr.	Frage	Link
1.1	Für welchen Bereich / Kategorie ist die Anwendung?	
1.2	Für welche Dauer soll die Anwendung genutzt werden?	
1.3	Soll während der Nutzung freie Bewegung stattfinden?	
2.1	Werden mehrdimensionale Informationen genutzt?	
2.1.1	Sind virtuelle Objekte der abzubildenden Gegenstände vorhanden?	
2.1.1.1	Ist der natürliche Raumbezug von Priorität?	
2.1.1.1.1	Soll die Anwendung ortsunabhängig durchgeführt werden können?	
2.1.1.1.1.1	Soll die Anwendung interaktiv gestaltet sein?	
2.1.1.1.1.1.1	Sollen reale Objekte digital mit eingebunden sein?	
2.1.1.1.1.1.2	Soll die Anwendung länger als 60 min am Stück genutzt werden?	1.2
2.1.1.2	Können dynamische Bilder genutzt werden?	
2.1.1.2.1	Ist der interaktive Raumbezug von Priorität?	
2.1.1.2.2	Ist der interaktive Raumbezug von Priorität?	
3.I.a.1	Soll die Darstellung so realistisch wie möglich sein?	
3.I.a.1.1	Ist die Anwendung nicht von der natürlichen Realität zu unterscheiden?	
3.I.a.1.2	Sind 3D-Objekte darzustellen?	
3.I.a.1.2.1	Sollen Texturen, Schatten und/oder Reflexionen angezeigt werden?	
3.I.b.1	Soll sich die nutzende Person während der Visualisierung bewegen können?	1.3
3.I.b.1.1	Ist das ideale Medium AR?	2.1.1.1.1
3.I.b.1.1.1	Sollen die Hände uneingeschränkt beweglich sein?	
3.I.b.1.1.2	Ist eine stationäre Lösung angestrebt?	1.2
3.II.1	Soll es ein auditives Feedback geben?	
3.II.1.1.a.1	Ist der Sound mehr als ein Ton zur Benachrichtigung?	
3.II.1.1.a.1.2	Soll der Sound räumlich zugeordnet werden können?	
3.II.1.1.a.1.1	Kann über den Sound Richtung und Entfernung wahrgenommen werden?	
3.II.1.1.a.1.1.1	Gibt es einen Unterschied zur natürlichen Realität?	
3.II.1.b.1	Soll während der Nutzung Bewegung stattfinden?	1.3
3.II.1.b.1.1	Sollen die Hände uneingeschränkt beweglich sein?	3.I.b.1.1.1
3.III.1	Soll ein haptisches Feedback genutzt werden?	
3.III.1.2	Findet Interaktion in der VE statt?	

Nr.	Frage	Link
3.III.1.1	Soll das Feedback auf den vollen Körper ausgelegt sein?	
3.III.1.1.1	Ist die Abstraktion durch Vibration ausreichend?	
3.III.1.1.1.2	Sollen reale Gegenstände eingebunden werden?	2.1.1.1.1.1.1
3.III.1.1.1.2.2	Soll es ein Force-Feedback geben?	
3.III.1.1.2	Ist die Abstraktion durch Vibration ausreichend?	
3.III.1.1.2.2	Soll es ein Force-Feedback geben?	
3.IV1	Soll es ein olfaktorisches Feedback geben?	
3.IV1.a.1	Soll der Duft beim Nutzenden verströmt werden?	
3.IV1.a.1.1	Finden eine aktive Überlagerung und Ausblendung von Gerüchen statt?	
3.IV1.b.1	Soll der Duft beim Nutzenden verströmt werden?	3.IV.1.a.1
3.IV1.b.1.1	Sollen die Hände frei beweglich sein?	3.I.b.1.1.1
3.V1	Soll es ein gustatorisches Feedback geben?	
3.V1.a.1	Soll der Geschmack nicht nur über Geruch repräsentiert werden?	
3.V1.a.1.1	Soll es mehr als eine Geschmacksrichtung geben?	
3.V1.a.1.1.1	Soll es mehr als zwei Geschmacksrichtungen geben?	
3.V1.b.1	Sollen die Hände frei beweglich sein?	3.I.b.1.1.1
4.I.a.1	Soll eine reale Hand in der VE genutzt werden?	
4.I.a.1.1	Soll die Bewegung der Hand der natürlichen Nutzung entsprechen?	
4.I.a.1.1.1	Sollen mehr als die Hände natürlich genutzt werden?	
4.I.a.1.1.1.1	Soll der gesamte Körper real abgebildet werden?	
4.I.b.1	Sollen mehr als die Hände abgebildet werden?	4.I.a.1.1.1
4.II.a.1	Soll die Bewegung aktiv durchgeführt werden?	
4.II.a.1.1	Soll die Bewegung über natürliche Bewegung durchgeführt werden?	
4.II.a.1.1.1	Wird die Position über natürliche Fortbewegung verändert?	
4.II.a.1.1.1.1	Sind keine Grenzen vorhanden?	
4.II.b.1	Wird die Bewegung mehr als durch eine abstrakte Handbewegung durchgeführt?	4.II.a.1.1
4.II.b.1.1.a	Soll auf Abstraktion durch z.B. Knöpfe weitgehend verzichtet werden?	
4.II.b.1.1.b	Soll die Körperbewegung zur Fortbewegung genutzt werden?	
4.II.b.1.1.b.1	Soll Abstraktion durch z.B. Simulatoren weitgehend verzichtet werden?	
5.I.1	Soll die Anwendung mit mehreren Nutzenden gleichzeitig durchgeführt werden?	
5.I.1.1	Sollen die Beteiligten miteinander agieren können?	
5.I.1.1.1	Soll die Interaktion natürlich ablaufen?	

Nr.	Frage	Link
5.I.1.1.1.1	Sollen die Beteiligten miteinander sprechen können?	
5.I.1.1.1.1.1	Soll ein reales Abbild sichtbar sein?	
5.I.1.1.1.1.2	Sollen die Beteiligten sich gegenseitig sehen können?	
5.II.1	Soll die Interaktion an die natürliche Realität angepasst werden?	
5.II.1.2	Sollen die virtuellen Objekte reale Interaktionseigenschaften besitzen?	3.III.1.2
5.II.1.1	Soll eine intuitive Nutzung möglich sein?	
5.II.1.1.1	Sollen Objekte wie in der Realität genutzt werden? Sind ggf. reale Objekte eingebunden?	2.1.1.1.1.1.1

A.3.3 Medienempfehlung

Tabelle A-14: Medienempfehlungen (basierend auf Abbildung 5-8 & Abbildung 5-9)

Medium	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Pan-Faktor [PP]		
				Ø	max.	min
2D	Es gibt kein preisgünstigeres Medium in der Digitalen Realität, um Ihre Anwendung umzusetzen.	Eine 2D-Anwendung ist das beste Medium für Ihre Anwendung.	Wenn die Informationen statisch sind kann ein Foto oder Video zu mehr Realismus führen. Weiter voraus gegriffen ist aber eine 3D-Anwendung empfehlenswert.	37,5	67	2
Foto	2D-Anwendungen können eine preisgünstigere Möglichkeit sein, Ihre Anwendung umzusetzen.	Fotografie ist das beste Medium für Ihre Anwendung.	Oftmals reicht das statische Bild nicht aus. Es ist deshalb leichter verständlich beim Einsatz von Film und Video oder sogar einer 3D-Anwendung.	18	32	4
Video	Wenn das bewegte Bild zu umständlich ist, vielleicht ist die reine Fotografie einfacher. Mit Fotografie oder einer 2D-Anwendung können Entwicklungsaufwand gespart werden.	Video und Film sind die besten Medien für Ihre Anwendung.	Beim Film sind feste zeitliche Abläufe und beschränkte Interaktionen festgelegt. Durch eine 3D-Anwendung kann die Interaktion gesteigert werden.	36	66	6
3D	Film oder Foto können den Aufwand zu einer 3D-Anwendung wesentlich verringern. Eventuell reicht es aus nur 3D-Objekte zu zeigen, ohne dass diese tatsächlich 3D sind.	Eine 3D-Anwendung ist das beste Medium für Ihre Anwendung.	Einige 3D-Anwendungen verursachen trotz räumlicher Komponente kein Raumgefühl. Hier kann es sinnvoll sein auf ein 360°-Foto oder Video zurückzugreifen.	46,5	88	8

Tabelle A-14: Medienempfehlungen (basierend auf Abbildung 5-8 & Abbildung 5-9)

Medium	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Pan-Faktor [PP]		
				Ø	max.	min
360°-Foto	Fotografie oder auch kleine 3D-Anwendungen können den Aufwand reduzieren und dennoch Ihre Anwendung umsetzen.	360°-Fotografie ist das beste Medium für Ihre Anwendung.	Statt eines statischen Abbilds können mittels dynamischer Abfolgen mehr Inhalte präsentiert werden. Ein 360°-Video oder noch besser eine VR-Anwendung ist zu empfehlen.	45,5	83	8
360°-Video	Wenn das bewegte Bild zu umständlich ist, vielleicht ist die 360 Grad-Fotografie einfacher. Mit Fotografie oder einer einfachen 3D-Anwendung können Entwicklungsaufwand gespart werden.	360°-Video ist das beste Medium für Ihre Anwendung.	Beim Film sind feste zeitliche Abläufe und beschränkte Interaktionen festgelegt. Durch eine VR-Anwendung werden die Interaktion, Immersion und somit Präsenz gesteigert.	46,5	85	14
VR	VR beschreibt die Immersion, Interaktion und das Vorhandensein einer virtuellen Umgebung. Immersion und eine geringe natürliche Interaktion können über einfache 360°-Anwendungen ebenfalls erzeugt werden.	VR ist das beste Medium für Ihre Anwendung.	Eine Möglichkeit die Immersion noch zu steigern, ist der Einsatz von natürlich realen Objekten oder der Umgebung in der virtuellen Umgebung.	54	94	14

Tabelle A-14: Medienempfehlungen (basierend auf Abbildung 5-8 & Abbildung 5-9)

Medium	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Pan-Faktor [PP]		
				Ø	max.	min
AV	Es ist oftmals aufwendig natürlich reale Gegenstände in der immersiv virtuellen Umgebung zu nutzen. Bei Verzicht auf die realen Objekte bzw. Umgebung kann eine rein virtuelle Anwendung in Form von VR den Aufwand verringern.	Erweiterte Virtualität ist das beste Medium für Ihre Anwendung.	Es ist kaum eine Steigerung möglich. Sollte aber die natürliche Realität im Anwendungsfall priorisiert werden, sollte AR als zukunftsorientierte Lösung umgesetzt werden.	56,5	95	18
AR	VR oder Erweiterte Virtualität sind preisgünstigere Möglichkeiten Ihre Anwendung umzusetzen.	AR ist das beste Medium für Ihre Anwendung.	Keine Empfehlung möglich.	54	98	10

A.4 Umsetzung des Pan-Faktors als Pan-Meter und der Handlungsempfehlung als HEL.P.

A.4.1 Excel-Tabellenkalkulation als Pan-Meter

Pan-Faktor
Ermittlungsformular

Name der Anwendung

Beispielanwendung

Anwendungsbereich

Ausbildung

Schritt 1: Immersion

Welche Sinne werden durch Ihre Anwendung bespielt?

☒ Visuelle Wahrnehmung

☐ Olfaktorische Wahrnehmung

☐ Auditive Wahrnehmung

☐ Gustatorische Wahrnehmung

☐ Haptische Wahrnehmung

Visuelle Wahrnehmung

Qualität:

Schematisch

Quantität:

Wenige

Details

Auditive Wahrnehmung

Qualität:

Keine

Quantität:

Keine

Details

Haptische Wahrnehmung

Qualität:

Keine

Quantität:

Keine

Details

Olfaktorische Wahrnehmung

Qualität:

Keine

Quantität:

Keine

Details

Gustatorische Wahrnehmung

Qualität:

Keine

Quantität:

Keine

Details

Schritt 2: Präzision

Abbildung A-2: Fragebogen des Pan-Meters in der Excel-Tabellenkalkulation - Teil 1 von 2

Welche der folgenden Elemente kommt bei Ihrer Anwendung vor?

☐ Körpergefühl
☐ Bewegung

Körpergefühl

Qualität: Keine

Quantität: Keine

Details

Bewegung

Qualität: Keine

Quantität: Keine

Details

Schritt 3: Interaktivität

Welche der folgenden Elemente kommt bei Ihrer Anwendung vor?

☐ Interaktion
☐ Kommunikation

Interaktion

Qualität: Keine

Quantität: Keine

Details

Kommunikation

Qualität: Keine

Quantität: Keine

Details

Pan-Faktor Ermitteln

Abbildung A-3: Fragebogen des Pan-Meters in der Excel-Tabellenkalkulation - Teil 2 von 2



Abbildung A-4: PDF-Datei des Ergebnisses aus dem Pan-Meter - Teil 1 von 3

Pan-Faktor für VR4Teach



VR4Teach

> Pan-Faktor: 38 von 100 <

Die Anwendung "VR4Teach" erreicht in der Kategorie "Ausbildung" einen durchschnittlichen Wert von 38. Die Anwendung "VR4Teach" liegt damit im Bereich der meisten Ingenieur Anwendungen der Digitalen Realität.

Die Graphik zeigt den Anteil an Immersion (19 Pan-Punkte) in lila, in gelb die Präsenz (7 Pan-Punkte) und den Anteil der Wechselwirkung (12 Pan-Punkte) in blau an.

Daneben kann die Anwendung mit anderen der Digitalen Realität im gleichen Bereich verglichen werden. Es sind 33 Anwendungen im Bereich "Ausbildung" hinterlegt. Hier beträgt der durchschnittliche Pan-Faktor 40 Pan-Punkte. Das Maximum liegt bei 57 Pan-Punkten und das Minimum bei 14 Pan-Punkten (Gestrichelte grüne Linien).

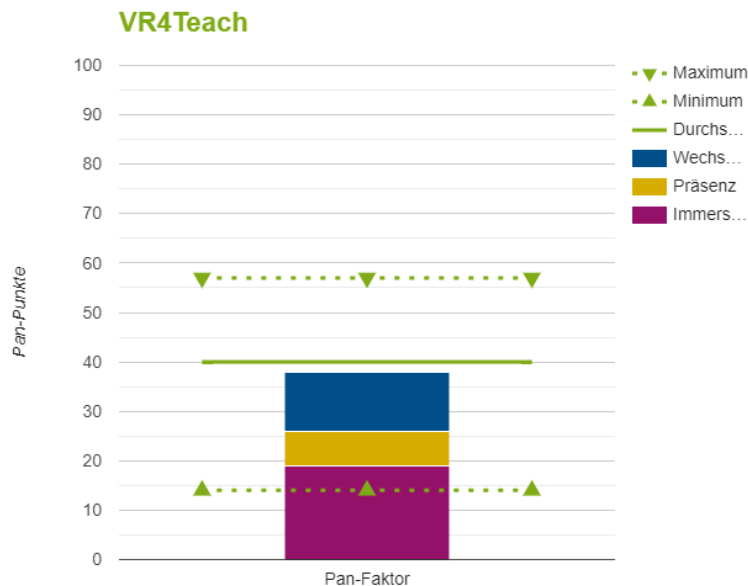


Abbildung: Pan-Faktor von VR4Teach im Vergleich zu anderen Anwendungen

Abbildung A-5: PDF-Datei des Ergebnisses aus dem Pan-Meter - Teil 2 von 3

Pan-Faktor für VR4Teach



Berechnungsdetails:

Bezeichnung	Detail	Faktor	Bewertung	Summe
Pan-Faktor				38/100
Immersion				19/60
Anzahl Sinne			6	
	Anzahl	1.5		
Visuell			7	
	Qualität	4		
	Quantität	3		
Auditiv			4	
	Qualität	2		
	Quantität	2		
Haptisch			2	
	Qualität	1		
	Quantität	1		
Olfaktorisch			0	
	Qualität	0		
	Quantität	0		
Gustatorisch			0	
	Qualität	0		
	Quantität	0		
Präsenz				7/20
Körpergefühl			4	
	Qualität	3		
	Quantität	1		
Bewegung			3	
	Qualität	2		
	Quantität	1		
Wechselwirkung				12/20
Interaktion			5	
	Qualität	2		
	Quantität	3		
Kommunikation			7	
	Qualität	2		
	Quantität	5		

Diese Berechnung wurde vom Panometer durchgeführt und maschinell am 31.01.2020 erstellt.
Entwickelt von Christian Eller 2019-2020 - Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen; TU Darmstadt;

3 von 3

Abbildung A-6: PDF-Datei des Ergebnisses aus dem Pan-Meter - Teil 3 von 3

Tabelle A-15: Ergebnisse der Probanden für die Bewertung des Pan-Faktors von VR4Teach

Einflussfaktor	T 1	T 2	T 3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
Immersion	22	21	21	24	18	21	21	26	24	13	15
Präsenz	5	7	8	8	14	13	8	11	8	16	14
Wechselwirkung	11	10	9	9	8	7	13	3	9	12	12
Pan-Faktor	38	38	38	41	40	41	42	40	41	41	41

Hinweis: Maßeinheit: Pan-Punkte
T : teilnehmende Person



Abbildung A-7: PDF-Datei des Ergebnisses von HEL.P.-Anwendungsfall 1 - Teil 1 von 5

Empfehlung für VR4Teach

Allgemeine Informationen

In der Kategorie "Ausbildung" sind zum Vergleich 33 Anwendungen vorhanden. Der durchschnittliche Pan-Faktor beträgt 40 Pan-Punkte. Dabei erreicht die beste Anwendung 57 Pan-Punkte.

Variante 1 "Preisgünstig" Möglicher Pan-Faktor 30 Pan-Punkte	Variante 2 "Optimum" Möglicher Pan-Faktor 61 Pan-Punkte	Variante 3 "Zukunftsorientiert" Möglicher Pan-Faktor 70 Pan-Punkte
---	--	---

Detailinformationen Variante 1 "Preisgünstig"

Möglicher Pan-Faktor

Es kann ein Pan-Faktor von 30 Pan Punkten erreicht werden.

Ein Vergleich in der Kategorie "Ausbildung" ergibt, dass diese Variante mit 10 Pan-Punkten unter dem Durchschnitt und 27 Pan-Punkte unter dem Maximum liegen kann. Es ist eine unterdurchschnittliche Anwendung zu erwarten.

Geeignetes Medium

VR beschreibt die Immersion, Interaktion und das Vorhandensein einer virtuellen Umgebung. Immersion und eine geringe natürliche Interaktion können über einfache 360 Grad-Anwendungen ebenfalls erzeugt werden.

Werden die 360 Grad-Bilder nun auch noch dynamisch erfasst, können diese als 360 Grad-Film betrachtet werden. Diese Filme ermöglichen dem Anwender den Fokus selbst zu bestimmen. Durch Drehungen des Kopfes, welche auf den Film oder das Foto uebertragen werden können, wird dieser interaktiv. Der Nutzer hat mehr Freiheiten und ist nicht mehr vollständig der Fuehrung durch das Medium ausgesetzt.

Abbildung A-8: PDF-Datei des Ergebnisses von HEL.P.-Anwendungsfall 1 - Teil 2 von 5

Detailinformationen Variante 2 "Optimum"

Möglicher Pan-Faktor

Es kann ein Pan-Faktor von 33 bis 61 Pan Punkten erreicht werden.

Ein Vergleich in der Kategorie "Ausbildung" ergibt, dass diese Variante mit 21 Pan-Punkten über dem Durchschnitt und 4 Pan-Punkte über dem Maximum liegen kann. Es ist eine überdurchschnittliche Anwendung zu erwarten, die alle bisherigen Anwendungen übertreffen kann.

Geeignetes Medium

VR ist das beste Medium für Ihre Anwendung.

Virtuelle Realität ist ein Medium zur Reizung mehrerer Sinne und "[...] eine computergenerierte interaktive Umgebung [= VE] zur Schaffung einer kuenstlichen Realität], die in Echtzeit berechnet und dargestellt wird. [...] Eine VR] ermöglicht das freie Explorieren sowie die Interaktion mit virtuellen Gegenständen und Personen." VR schafft durch die Nutzung mehrere Sinne und Wahrnehmungsformen eine Immersion und das Gefuehl von Präsenz, wodurch für den Anwender eine kuenstliche Realität entsteht.

Geeignete Displayarten

- Visuelle Displays:
 1. On-Body-Displays sind am Körper getragene oder befestigte Displays. Sie bewegen sich mit dem Nutzer mit.
 2. Head-Mounted-Displays gehören zu den On-Body-Displays und werden am Kopf getragen z.B. als VR-Brille.
 3. See-Through-Displays gehören zu den Head-Mounted-Displays. Diese Brillen ermöglichen den Blick auf die natürliche Realität wie z.B. AR-Brillen.
 4. Non-See-Through-Displays gehören zu den Head-Mounted-Displays. Diese Brillen verhindern den Blick auf die natürliche Realität wie z.B. VR-Brillen.
- Auditive Displays:
 1. World-Fixed-Displays sind Bildschirme die feststehend oder fixiert sind. Diese bewegen sich nicht mit dem Nutzer mit.
 2. Fishtank-Display gehören zu den World-Fixed-Displays und sind z.B. Computermonitore.
 3. Surround-Display gehören zu den World-Fixed-Displays und sind z.B. CAVEs.
- Haptische Displays:
 1. Hand-Held-Display gehören zu den On-Body-Displays und werden in der Hand gehalten wie z.B. Smartphones.
- Olfaktorische Displays:

Für diesen Typ sind keine Vorschläge vorhanden. Dies liegt daran, da die Art von Nutzung nicht ausgewählt wurde.
- Gustatorische Displays:

Für diesen Typ sind keine Vorschläge vorhanden. Dies liegt daran, da die Art von Nutzung nicht ausgewählt wurde.
- Displays zur Steigerung der Präsenz mittels Körpergefühl:
 1. Hand-Held-Display gehören zu den On-Body-Displays und werden in der Hand gehalten wie z.B. Smartphones.

Abbildung A-9: PDF-Datei des Ergebnisses von HEL.P.-Anwendungsfall 1 - Teil 3 von 5

Handlungsempfehlung mittels Pan-Faktor für VR4Teach



- Displays zur Steigerung der Präsenz mittels Bewegung:
 1. Hand-Held-Display gehören zu den On-Body-Displays und werden in der Hand gehalten wie z.B. Smartphones.

Empfohlene Qualitätsumsetzungen

- Visuelle Wahrnehmung: Realitätsnah
Es ist eine realitätsnahe Visualisierung umgesetzt. Die Darstellung nähert sich der Realität in Textur, Schattenbildung und Reflexionen. Der Unterschied von virtuellen zu realen Objekten ist nur in Teilen oder im Fokus zu unterscheiden. Kennwerte: FOR: 70-92%; DOF: 3-6; Beispiel: Detaillierte 3D-Gebäudemodelle
- Auditive Wahrnehmung: Realitätsnah
Es ist eine realitätsnahe Form von Sound umgesetzt. Die Klangqualität wird durch die Nutzung von mehreren Tonspuren, Effekten natürlicher. Der Sound kann unterschiedlichen Richtungen zugeordnet werden. Interferenzen und Entfernungen zur Soundquelle sind wahrnehmbar. Kennwerte: FOR: 70-92%; DOF: 3-6; Beispiel: Umfassender (360°) Sound, Ausgerichtete objektbezogene Soundquellen
- Haptische Wahrnehmung: Einfach
Es ist eine einfache Haptik umgesetzt. Objekte und Umgebung werden über ein einfaches haptisches Feedback wahrnehmbar gestaltet. Kennwerte: FOR: 24-46%; DOF: 15-39; Beispiel: Ungerichtete Vibration
- Olfaktorische Wahrnehmung: Keine
Keine weitere Definition vorhanden.
- Gustatorische Wahrnehmung: Keine
Keine weitere Definition vorhanden.
- Körpergefühl: Abstrakt
Das Körpergefühl ist abstrakt umgesetzt. Mindestens ein Gliedmaßen wird über Abstraktionen dargestellt und bewegt sich identisch zur natürlichen Realität. Kennwerte: FOR: 47-69%; DOF: 6-26; Beispiel: Abbildung von Controllern an beiden Händen und damit eine Visualisierung der Extremitäten
- Bewegung: Abstrakt
Die Bewegung ist abstrakt umgesetzt. Der Körper kann vor Ort frei bewegt werden, zur Positionsveränderung wird auf abstrakte Möglichkeiten zurückgegriffen. Kennwerte: FOR: 47-69%; DOF: 2-5; Beispiel: Teleport, Szenen- basierte Positionsänderung
- Interaktion: Einfach
Die Interaktion ist einfach umgesetzt. Objekte und Umgebung sind so gestaltet, dass mit Ihnen in einfacher Form und nur in Teilen Ihrer Funktion entsprechen interagiert werden kann. Kennwerte: FOR: 24-46%; DOF: 1-3; Beispiel: Hochheben von Objekten durch virtuelle oder reale Bewegungen
- Kommunikation: Einfach
Die Kommunikation ist einfach umgesetzt. Über sprachbasierte Verfahren oder über Methoden wie Markieren kann zwischen unterschiedlichen Parteien Informationen ausgetauscht werden. Kennwerte: FOR: 24-46%; DOF: 0-3; Beispiel: Telefonie, Bildschirmübertragung

Zusätzliche Hinweise

Umsetzung der Kommunikation als Funktions- & Datenaustausch.

Abbildung A-10: PDF-Datei des Ergebnisses von HEL.P.-Anwendungsfall 1 - Teil 4 von 5

Handlungsempfehlung mittels Pan-Faktor für VR4Teach



Detailinformationen Variante 3 "Zukunftsorientiert"

Möglicher Pan-Faktor

Es kann ein Pan-Faktor von 70 Pan Punkten erreicht werden.

Ein Vergleich in der Kategorie "Ausbildung" ergibt, dass diese Variante mit 30 Pan-Punkten über dem Durchschnitt und 13 Pan-Punkte über dem Maximum liegen kann. Es ist eine überdurchschnittliche Anwendung zu erwarten, die alle bisherigen Anwendungen übertreffen kann.

Geeignetes Medium

Innerhalb der AV wird die virtuelle Umgebung erweitert, indem natürlich reale Elemente aufgenommen und verwendet werden. Findet VR vollständig in einer künstlichen Umgebung statt, wird bei der AV die natürliche Umgebung oder einzelne natürlich reale Objekte aufgenommen. Dabei ist der wesentliche Bestandteil der virtuellen Umgebung allerdings künstlich und nur in einem geringeren Anteil die natürliche Realität vorhanden.

Diese Berechnung wurde von HEL.P. durchgeführt und maschinell am 20.04.2020 erstellt.
Entwickelt von Christian Eller 2019-2020 - Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen; TU Darmstadt;

5 von 5

Abbildung A-11: PDF-Datei des Ergebnisses von HEL.P.-Anwendungsfall 1 - Teil 5 von 5

Handlungsempfehlung mittels Pan-Faktor (HEL.P.) für Ihre Anwendung



HEL.P. ist eine Handlungsempfehlung für Ingenieur Anwendungen innerhalb der Digitalen Realität (DR). Über einen interaktiven Fragebogen können Anforderungen an eine Software in Erfahrung gebracht und mit dem Vergleich zu anderen Anwendungen der gleichen Kategorie verschiedene Varianten ausgearbeitet werden. Dabei handelt es sich um eine Empfehlung des geeigneten Mediums, der zu nutzenden Displayarten verschiedener Sinne und die Entwicklungsqualitäten bzw. Detailstufen der verschiedenen Reize. Es wird ein fiktiver Pan-Faktor berechnet oder ein bestehender verwendet um einen Vergleich in der aktuellen Softwarelandschaft heranzuziehen.

Abbildung A-12: PDF-Datei des Ergebnisses von HEL.P.-Anwendungsfall 3 Teil 1 von 5

Empfehlung für VR4Teach

Allgemeine Informationen

In der Kategorie "Ausbildung" sind zum Vergleich 33 Anwendungen vorhanden. Der durchschnittliche Pan-Faktor beträgt 40 Pan-Punkte. Dabei erreicht die beste Anwendung 57 Pan-Punkte.

Variante 2 "Optimum" Möglicher Pan-Faktor 54 Pan-Punkte	Variante 3 "Zukunftsorientiert" Möglicher Pan-Faktor 94 Pan-Punkte
--	---

Detailinformationen Variante 2 "Optimum"

Möglicher Pan-Faktor

Es kann ein Pan-Faktor von 38 bis 54 Pan Punkten erreicht werden.

Ein Vergleich in der Kategorie "Ausbildung" ergibt, dass diese Variante mit 14 Pan-Punkten über dem Durchschnitt und 3 Pan-Punkte unter dem Maximum liegen kann. Es ist eine überdurchschnittliche Anwendung zu erwarten.

Geeignetes Medium

VR ist das beste Medium für Ihre Anwendung.

Virtuelle Realität ist ein Medium zur Reizung mehrerer Sinne und "[...] eine computergenerierte interaktive Umgebung [= VE] zur Schaffung einer kuenstlichen Realität], die in Echtzeit berechnet und dargestellt wird. [...] Eine VR] ermöglicht das freie Explorieren sowie die Interaktion mit virtuellen Gegenständen und Personen." VR schafft durch die Nutzung mehrere Sinne und Wahrnehmungsformen eine Immersion und das Gefuehl von Präsenz, wodurch für den Anwender eine kuenstliche Realität entsteht.

Empfohlene Qualitätsumsetzungen

Umsetzung der Immersion

Die visuelle Wahrnehmung sollte in einer Umsetzung der Qualität "Realitätsnah" in einer Quantität von "Vollständig" erfolgen.

Nähere Erläuterung:

Es ist eine realitätsnahe Visualisierung umgesetzt. Die Darstellung nähert sich der Realität in Textur, Schattenbildung und Reflexionen. Der Unterschied von virtuellen zu realen Objekten ist nur in Teilen oder im Fokus zu unterscheiden. Kennwerte: FOR: 70-92%; DOF: 3-6; Beispiel: Detaillierte 3D-Gebäudemodelle.

Die auditve Wahrnehmung sollte in einer Umsetzung der Qualität "Einfach" in einer Quantität von "Vollständig" erfolgen.

Nähere Erläuterung:

Abbildung A-13: PDF-Datei des Ergebnisses von HEL.P.-Anwendungsfall 3 Teil 2 von 5

Handlungsempfehlung mittels Pan-Faktor für VR4Teach

Es ist eine einfache Form von Sound umgesetzt. Es wird eine Tonspur wiedergegeben, die keinen räumlichen Bezug oder besondere Klangqualität verfügt. Kennwerte: FOR: 24-46%; DOF: 0-3; Beispiel: Ungerichtetes Gespräch, Musik, Erklärungstonspur.

Die haptische Wahrnehmung sollte in einer Umsetzung der Qualität "Schematisch" in einer Quantität von "Vollständig" erfolgen.

Nähere Erläuterung:

Es ist eine schematische Haptik umgesetzt. Es gibt keine Repräsentation der Haptik, aber durch die Nutzung einer Hardwarekomponente kann in der Digitale Realität Objekte oder Umgebung berührt, verändert, ausgewählt u.ä. werden. Kennwerte: FOR: 1-23%; DOF: 0-14; Beispiel: Maus-Klickereignis, Controller-Klickereignis, Joystick-Klickereignis.

Die olfaktorische Wahrnehmung wird nicht umgesetzt. Die gustatorische Wahrnehmung wird nicht umgesetzt.

Umsetzung der Präsenz

Die Bewegung sollte in einer Umsetzung der Qualität "Einfach" in einer Quantität von "Vollständig" erfolgen.

Nähere Erläuterung:

Die Bewegung ist einfach umgesetzt. Mit Hilfe einfacher Interaktionen kann die Position verändert werden. Kennwerte: FOR: 24-46%; DOF: 1-3; Beispiel: Steuerung durch Maus und Tastatur, Betätigen einer Schaltfläche.

Das Körpergefühl sollte in einer Umsetzung der Qualität "Abstrakt" in einer Quantität von "Vollständig" erfolgen.

Nähere Erläuterung:

Das Körpergefühl ist abstrakt umgesetzt. Mindestens ein Gliedmaßen wird über Abstraktionen dargestellt und bewegt sich identisch zur natürlichen Realität. Kennwerte: FOR: 47-69%; DOF: 6-26; Beispiel: Abbildung von Controllern an beiden Händen und damit eine Visualisierung der Extremitäten.

Umsetzung der Wechselwirkung

Die Interaktion sollte in einer Umsetzung der Qualität "Einfach" in einer Quantität von "Vollständig" erfolgen.

Nähere Erläuterung:

Die Interaktion ist einfach umgesetzt. Objekte und Umgebung sind so gestaltet, dass mit Ihnen in einfacher Form und nur in Teilen Ihrer Funktion entsprechen interagiert werden kann. Kennwerte: FOR: 24-46%; DOF: 1-3; Beispiel: Hochheben von Objekten durch virtuelle oder reale Bewegungen.

Die Kommunikation sollte in einer Umsetzung der Qualität "Abstrakt" in einer Quantität von "Vollständig" erfolgen.

Nähere Erläuterung:

Die Kommunikation ist abstrakt umgesetzt. Über sprachbasierte Verfahren unterstützt mit der Anzeige von Avataren oder digitalen Abbildungen kann zwischen unterschiedlichen Parteien Informationen ausgetauscht bzw. Bewegungen angezeigt werden. Kennwerte: FOR: 47-69%; DOF: 3-6; Beispiel: Videotelefonie, Social-VR.

Abbildung A-14: PDF-Datei des Ergebnisses von HEL.P.-Anwendungsfall 3 Teil 3 von 5

Zusätzliche Hinweise

Keine zusätzlichen Empfehlungen vorhanden.

Detailinformationen Variante 3 "Zukunftsorientiert"

Möglicher Pan-Faktor

Es kann ein Pan-Faktor von 94 Pan Punkten erreicht werden.

Ein Vergleich in der Kategorie "Ausbildung" ergibt, dass diese Variante mit 54 Pan-Punkten über dem Durchschnitt und 37 Pan-Punkte über dem Maximum liegen kann. Es ist eine überdurchschnittliche Anwendung zu erwarten, die alle bisherigen Anwendungen übertreffen kann.

Geeignetes Medium

VR ist das beste Medium für Ihre Anwendung.

Virtuelle Realität ist ein Medium zur Reizung mehrerer Sinne und "[...] eine computergenerierte interaktive Umgebung [= VE] zur Schaffung einer kuenstlichen Realität], die in Echtzeit berechnet und dargestellt wird. [...] Eine VR] ermöglicht das freie Explorieren sowie die Interaktion mit virtuellen Gegenständen und Personen." VR schafft durch die Nutzung mehrere Sinne und Wahrnehmungsformen eine Immersion und das Gefuehl von Präsenz, wodurch für den Anwender eine kuenstliche Realität entsteht.

Empfohlene Qualitätsumsetzungen

Umsetzung der Immersion

Die visuelle Wahrnehmung sollte in einer Umsetzung der Qualität "Realitätsnah" in einer Quantität von "Vollständig" erfolgen.

Nähere Erläuterung:

Es ist eine realitätsnahe Visualisierung umgesetzt. Die Darstellung nähert sich der Realität in Textur, Schattenbildung und Reflexionen. Der Unterschied von virtuellen zu realen Objekten ist nur in Teilen oder im Fokus zu unterscheiden. Kennwerte: FOR: 70-92%; DOF: 3-6; Beispiel: Detaillierte 3D-Gebäudemodelle.

Die auditve Wahrnehmung sollte in einer Umsetzung der Qualität "Einfach" in einer Quantität von "Vollständig" erfolgen.

Nähere Erläuterung:

Es ist eine einfache Form von Sound umgesetzt. Es wird eine Tonspur wiedergegeben, die keinen räumlichen Bezug oder besondere Klangqualität verfügt. Kennwerte: FOR: 24-46%; DOF: 0-3; Beispiel: Ungerichtetes Gespräch, Musik, Erklärungstonspur.

Die haptische Wahrnehmung sollte in einer Umsetzung der Qualität "Schematisch" in einer Quantität von "Vollständig" erfolgen.

Nähere Erläuterung:

Abbildung A-15: PDF-Datei des Ergebnisses von HEL.P.-Anwendungsfall 3 Teil 4 von 5

Handlungsempfehlung mittels Pan-Faktor für VR4Teach

Es ist eine schematische Haptik umgesetzt. Es gibt keine Repräsentation der Haptik, aber durch die Nutzung einer Hardwarekomponente kann in der Digitale Realität Objekte oder Umgebung berührt, verändert, ausgewählt u.ä. werden. Kennwerte: FOR: 1-23%; DOF: 0-14; Beispiel: Maus-Klickereignis, Controller-Klickereignis, Joystick-Klickereignis.

Die olfaktorische Wahrnehmung wird nicht umgesetzt. Die gustatorische Wahrnehmung wird nicht umgesetzt.

Umsetzung der Präsenz

Die Bewegung sollte in einer Umsetzung der Qualität "Einfach" in einer Quantität von "Vollständig" erfolgen.

Nähere Erläuterung:

Die Bewegung ist einfach umgesetzt. Mit Hilfe einfacher Interaktionen kann die Position verändert werden. Kennwerte: FOR: 24-46%; DOF: 1-3; Beispiel: Steuerung durch Maus und Tastatur, Betätigen einer Schaltfläche.

Das Körpergefühl sollte in einer Umsetzung der Qualität "Abstrakt" in einer Quantität von "Vollständig" erfolgen.

Nähere Erläuterung:

Das Körpergefühl ist abstrakt umgesetzt. Mindestens ein Gliedmaßen wird über Abstraktionen dargestellt und bewegt sich identisch zur natürlichen Realität. Kennwerte: FOR: 47-69%; DOF: 6-26; Beispiel: Abbildung von Controllern an beiden Händen und damit eine Visualisierung der Extremitäten.

Umsetzung der Wechselwirkung

Die Interaktion sollte in einer Umsetzung der Qualität "Einfach" in einer Quantität von "Vollständig" erfolgen.

Nähere Erläuterung:

Die Interaktion ist einfach umgesetzt. Objekte und Umgebung sind so gestaltet, dass mit Ihnen in einfacher Form und nur in Teilen Ihrer Funktion entsprechen interagiert werden kann. Kennwerte: FOR: 24-46%; DOF: 1-3; Beispiel: Hochheben von Objekten durch virtuelle oder reale Bewegungen.

Die Kommunikation sollte in einer Umsetzung der Qualität "Abstrakt" in einer Quantität von "Vollständig" erfolgen.

Nähere Erläuterung:

Die Kommunikation ist abstrakt umgesetzt. Über sprachbasierte Verfahren unterstützt mit der Anzeige von Avataren oder digitalen Abbildungen kann zwischen unterschiedlichen Parteien Informationen ausgetauscht bzw. Bewegungen angezeigt werden. Kennwerte: FOR: 47-69%; DOF: 3-6; Beispiel: Videotelefonie, Social-VR.

Diese Berechnung wurde von HEL.P. durchgeführt und maschinell am 15.04.2020 erstellt.
Entwickelt von Christian Eller 2019-2020 - Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen; TU Darmstadt;

Abbildung A-16: PDF-Datei des Ergebnisses von HEL.P.-Anwendungsfall 3 Teil 5 von 5